

AALTO-YLIOPISTO  
Insinööritieteiden korkeakoulu  
Koneenrakennustekniikan laitos

Janne Mikkonen

**Ydinpolttoaineen jälkilämpötehon mittaamiseen käytettävän  
kalorimetrin suunnittelu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo 7.11.2012

Työn valvoja	Ma. professori Jari Juhanko
Työn ohjaaja	Diplomi-insinööri Sampsa Launiainen

---

**Tekijä** Janne Mikkonen

---

**Työn nimi** Ydinpolttoaineen jälkilämpötehon mittaamiseen käytettävän kalorimetrin suunnittelu

---

**Laitos** Koneenrakennustekniikan laitos

---

**Professuuri** Koneensuunnitteluoppi

**Professuurikoodi** Kon-41

---

**Työn valvoja** Ma. professori Jari Juhanko

---

**Työn ohjaaja** Diplomi-insinööri Sampsa Launiainen

---

**Päivämäärä** 7.11.2012

**Sivumäärä** 106

**Kieli** Suomi

---

Ydinvoimayhtiö on velvollinen huolehtimaan ydinjätteen loppusijoituksesta. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus tehdään kallioperään louhittavaan tunneliverkostoon. Polttoaineen asettelua loppusijoitustilaan rajoittaa sen tuottama jälkilämpöteho, sillä kapselin pinnalle joutuva vesi voi kiehuessaan saostaa suoloja ja vaarantaa kapselin pitkäaikaisen tiiviyn.

Jälkilämpötehon suuruus voidaan arvioida laskennallisesti, mutta laskentamenetelmän tulosten oikeellisuus täytyy validoida kokeellisesti ennen loppusijoituksen aloittamista. Kokeellisiin mittauksiin käytetään kalorimetriä, jonka sisään tutkittava polttoaine asetetaan. Kalorimetri on lämpötiivis astia, jonka lämpötekniset ominaisuudet tunnetaan. Mittaamalla polttoaineen aiheuttama lämpötilan muutos mittauspiiristä saadaan tietoon kappaleen lämpöteho.

Työn tavoitteena on kehittää konsepti mittauksiin käytettävästä kalorimetristä ja arvioida sen kykyä suoriutua mittauksista. Taustaselvityksessä tehdään katsaus ydinvoimalalla käytettyihin jälkilämpötehon mittaamenetelmiin. Kalorimetrin toimintaperiaatteen kehittämisessä hyödynnetään alan parhaita käytäntöjä. Kehitettyjä konsepteja verrataan toisiinsa valmistettavuuden, käytettävyyden ja mittauksen toteutettavuuden perusteella. Kaksi parasta konseptia valitaan jatkokehitykseen, jonka lopputuloksena valitaan lupaavin konsepti.

Valitun konseptin päämitat määritetään lujuusopillisen tarkastelun avulla. Mittoja käytetään rakenteen lämpöhäviöiden ja -kapasiteettien määrittämiseen. Rakenteen soveltuvuutta mittauskäyttöön arvioidaan simulointimallin avulla. Työn lopputuloksena esitetään rakennemalli, joka täyttää sille asetettavat vaatimukset ja on kykenevä lämpötehon mittaamiseen.

---

**Avainsanat** Ydinpolttoaine, jälkilämpö, lämpötehon mittaaminen, kalorimetri

---



---

**Author** Janne Mikkonen

---

**Title of thesis** Development of a calorimeter for measuring the residual heat of a nuclear fuel

---

**Department** Department of Engineering Design and Production

---

**Professorship** Machine Design

---

**Code of professorship** Kon-41

---

**Thesis supervisor** Professor (acting) Jari Juhanko

---

**Thesis advisor** Sampsa Launiainen M.Sc. (Tech.)

---

**Date** 07 November 2012

---

**Number of pages** 106

---

**Language** Finnish

---

Due to the Finnish nuclear energy act, a nuclear power company is obligated to take care of final disposal of nuclear waste. The final disposal of the nuclear fuel is intended to commit at tunnels in bedrock. The residual heat of spent fuel is limiting the density of disposal tunnels. If the disposal canister overheats, the groundwater can boil and precipitate salts on a surface of the canister. Salts can accelerate the corrosion of the canister and endanger its long term gas-tightness.

The quantity of residual heat can be estimated by numerical methods, but calculation code must be validated prior to the final disposal. Validation can be performed by experimental measurements, taken by a calorimeter. Calorimeter is a heat-tight container, which thermal properties are known. By placing the spent nuclear fuel inside the container and measuring the rate of heat change of the container, the heat output of the fuel can be determined.

The object of this master's thesis is to develop a concept of a calorimeter and evaluate its capability to perform the measurements. A literature review to methods used in the measurements of residual heat is made in a research chapter. The aim of the review is to understand the level of the technology used in measurements. Generated concepts are compared between manufacturing, usability and ability to perform the measurements. Two concepts were selected for further development. The outcome of development is the selection of the most promising concept.

The concept's principal dimensions are determined by strength analysis. Dimensions are used to specify structure's heat losses and heat capacity. Structures suitability for measurements is evaluated with a simulation model. The result of the thesis is the model of the calorimeter, which fulfils demands and is capable to execute the required measurements.

---

**Keywords** Nuclear fuel, residual heat, measuring of a heat output, calorimeter

---

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Fortum Power & Heat Oy:lle. Työn valvojana on toiminut professori Jari Juhanko Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulusta. Yrityksessä ohjaajana on toiminut diplomi-insinööri Sampsa Launiainen.

Haluan kiittää yhtiötä mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Sampsa on antanut arvokkaita neuvoja ja uusia näkökulmia koko lopputyöprosessin ajan. Jari on auttanut hahmottamaan työn sisältöä ja laajuutta, sekä auttanut useissa käytännön ongelmissa. Diplomi-insinööri Karo Kustonen on auttanut työn tuloksien arviointiin tarvittavan simulointimallin tekemisestä ja tulosten tulkinnoissa. Kiitos teille antamastanne avusta ja tuesta.

Näiden lisäksi työhön on liittynyt useita henkilöitä Fortumista, Lappeenrannan teknillisestä yliopista ja Posiva Oy:stä, joiden kanssa olen käynyt mielenkiintoisia keskusteluja ja saanut arvokkaita kommentteja.

Erityisen maininnan ansaitsee perhe, joka on ollut tukena koko opiskeluajan ja kannustanut tähtäämään korkealle. Suuret kiitokset kuuluvat rakkaalle avopuolisolleni Sinille, joka on jaksanut tukea myös niiden raskaiden päivien jälkeen.

Espoossa 7.11.2012



Janne Mikkonen



# Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	1
1.1	Tausta .....	1
1.2	Ongelma .....	1
1.3	Tavoite .....	2
1.4	Rajaukset .....	2
2	Taustaselvitys .....	3
2.1	Säteily .....	3
2.1.1	Radioaktiivinen hajoaminen .....	3
2.1.2	Säteilyn vaikutus aineeseen .....	4
2.1.3	Fissio .....	5
2.2	Ydinpolttoaine .....	6
2.2.1	Polttoaineen kierto .....	6
2.2.2	Polttoaineen rakenne .....	7
2.2.3	Muutokset fissiossa .....	8
2.2.4	Käsittely .....	8
2.2.5	Palama ja jälkilämpö .....	8
2.3	Jälkilämmön mittauksessa käytetyt menetelmät .....	10
2.3.1	Spektrometrinen mittaus .....	10
2.3.2	Kalorimetrinen mittaus .....	12
2.4	Kalorimetrisissä mittauksissa käytetyt laitteistot .....	13
2.4.1	Hanford Engineering Development Laboratory .....	14
2.4.2	GE-Morris Operation .....	15
2.4.3	Swedish Central Interim Storage Facility (CLAB) .....	16
2.5	Mittausprosessi .....	18
2.5.1	Mittauksen kulku .....	20
2.5.2	Arvio mitattavista tehoista .....	21
2.5.3	Mallikoe .....	22
2.5.4	Koetulosten arviointi matemaattisen mallin perusteella .....	23
2.6	Ydinenergian viranomaisvaatimukset .....	24
2.6.1	Ydinvoimalaitoksen turvallisuusluokat ja niiden merkitys .....	26
2.7	Ydintekniset käyttötapaukset .....	27
3	Suunnittelumenetelmät .....	29
3.1	Systemaattinen tuotekehitys .....	29
3.1.1	Tehtävän selvittely .....	30
3.1.2	Luonnostelu .....	31
3.1.3	Kehittely .....	36
3.2	Tietokoneavusteinen simulointi .....	37
4	Tulokset .....	39
4.1	Kalorimetrin toiminnalle asetettavat vaatimukset .....	39
4.2	Kalorimetrin toimintorakenne .....	43
4.3	Tunnetun järjestelmän rakenneanalyysi .....	47
4.4	Rakennevaihtoehdot .....	52
4.4.1	Vaihtoehtojen arviointi .....	54
4.4.2	Vaihtoehtojen jatkokehittely .....	55
4.5	Mitoitusperiaatteet .....	63
4.5.1	Lämmön siirtyminen .....	63
4.5.2	Lujuusopillinen tarkastelu .....	71



4.5.3	Putkisto ja komponentit.....	80
4.5.4	Mittauksen instrumentointi .....	82
4.5.5	Kalibrointielementti .....	83
4.5.6	Muutokset putkitus ja instrumentointikaavioon .....	85
5	Tulosten arviointi .....	87
5.1	Kehitetty laitekonsepti.....	87
5.2	Vaatimusten täyttyminen.....	87
5.3	Mittaukseen toteutettavuus.....	89
5.3.1	Rakenteiden sitoma lämpömäärä .....	89
5.3.2	Rakenteen lämpöhäviö .....	91
5.3.3	Kalorimetrin toiminnan simuloiminen .....	94
5.3.4	Tulosten arvioiminen.....	97
5.4	Epävarmuudet.....	97
5.5	Tuotekehityksen jatkaminen .....	98
6	Yhteenveto .....	101

## Lyhenteet ja käsitteet

Apros	Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen (VTT) ja Fortumin yhteistyönä kehitetty ohjelmisto (advanced process simulator, APROS). Ohjelma soveltuu prosessi-, säätö- ja automaatio suunnitteluun ja prosessien analysointiin.
ASME	Amerikan yhdysvalloissa toimiva järjestö, joka laatii ja ylläpitää standardeja (american society of mechanical engineers, ASME).
IAEA	Kansainvälinen atomienergiajärjestö (international atomic energy agency, IAEA). Yhdistyneiden kansakuntien alainen järjestö, joka pyrkii edistämään ydinenergian rauhanomaista käyttöä
Isotooppi	Saman alkuaineen isotoopit eroavat toisistaan neutronien lukumäärältä. Ei vaikuta aineen kemiallisiin ominaisuuksiin, mutta voi tehdä atomista epävakaa.
Kalibrointi	Kalibroinnilla määritetään mittalaitteen näyttämän virhe. Kalibrointiin käytetään tunnettua vertailusuuretta, jolla on yhteys kansainväliseen mittanormaaliin.
NEA	OECD:n alainen ydinenergian asiantuntijajärjestö (nuclear energy agency, NEA). Päätehtävänä on edistää ydinvoiman rauhanomaista käyttöä.
ORIGEN	Osa Yhdysvaltojen ydinturvallisuusvirastolle kehitettyä SCALE ohjelmistoa (Nuclear regulatory commission, NRC). Käytetään käytetyn ydinpolttoaineen ominaisuuksien määrittämiseen.
Simulointi	Simulointi on keinotekoinen kuvaus todellisesta maailmasta. Tietokoneavusteisessa simuloinnissa rakennetaan matemaattinen malli tutkittavasta tapahtumasta, jonka avulla pyritään ymmärtämään ja ennustamaan tapahtuman käyttäytyminen.

Sironta	Fysikaalinen prosessi, missä säteily muuttaa suuntaa kohdatesaan esteen.
STUK	Säteilyturvakeskus, STUK. Sosiaali- ja terveysministeriön hallinnonalaan kuuluva Suomen säteily- ja ydinturvallisuusvalvonnasta vastaava viranomainen.
Superpositio	Lujuusopissa käytetty periaate, jonka mukaan lineaarisesti käyttäytyvään kappaleeseen kohdistuvien voimien kokonaisvaikutus saadaan laskemalla yhteen niiden erillisvaikutukset.
Validointi	Prosessi, jolla tarkistetaan täyttääkö tutkittava kohde sille asetetut vaatimukset. Esimerkiksi vastaako laskentamallin tulokset reaali maailman käyttäytymistä.
Ydinvoima	Atomin ytimen koossa pitävä vetovoima, joka on suurempi kuin saman sähkövarauksen omaavien protonien poistovoima.



# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Ydinvoimalaitoksella syntyy käytettyä ydinpolttoainetta energiantuotannon seurauksena. Käytetty polttoaine on voimakkaasti radioaktiivista ja sen turvallinen käsittely edellyttää tehokasta säteilysuojelua. Käytetyn polttoaineen aktiivisuus pienenee ajan kuluessa, mutta kestää satoja tuhansia vuosia, ennen kuin polttoaineen kokonaisaktiivisuus vastaa alkuperäisen uraanimalmin aktiivisuutta.

Ydinenergilain mukaan ydinvoimayhtiö on velvoitettu huolehtimaan ydinjätteestä siten, ettei se aiheuta vaaraa ympäristölle ja sen leviäminen on estetty. Lisäksi ydinenergilain mukaan Suomessa syntyneet ydinjätteet on käsiteltävä, varastoitava ja loppusijoitettava Suomeen. Loppusijoitus on tarkoitus tehdä sijoittamalla jäte kallioperään louhittavaan tunneliverkostoon. Tätä varten Teollisuuden Voima Oyj ja Fortum Power & Heat Oy ovat perustaneet Posiva Oy:n vastaamaan ydinpolttoaineen loppusijoituksesta ja siihen liittyvistä tutkimuksista.

Posiva Oy:n valmistelemassa mallissa radioaktiivinen jäte suljetaan loppusijoituskapselin sisälle ennen hautaamista kallioperään. Yhdessä kapselissa on tilaa 12 polttoainepulle. Kapselien sijoittamista rajaa niiden tuottama jälkilämpö.

Mikäli loppusijoituskapseli ylikuumenee, voi sen pinnalle kulkeutuva vesi kiehua ja saostaa suoloja. Suolat kiihdyttävät kapselille haitallista korroosiota ja voivat vaarantaa sen pitkäaikaisen tiiveyden. Lämpenemiseen vaikuttaa polttoaineen tuottama jälkilämpöteho, ympäröivän kallion lämmönjohtavuus sekä kapselien välinen etäisyys maaperässä.

Tuntemalla yksittäisten polttoainepippujen jälkilämpö voidaan laskea kapselin tuottama lämpöteho. Tietämällä teho ja ympäröivän kallion lämmönjohtavuus voidaan kapselit sijoittaa mahdollisimman tiiviisti huomioiden kuitenkin riittävät turvaetäisyydet. Tiiviillä sijoittelulla voidaan pienentää loppusijoituksen kustannuksia, sillä tunnelien rakentaminen on kallista.

## 1.2 Ongelma

Koska polttoaineen käyttöhistoria on tarkkaan tunnettu, voidaan sen perusteella tehdä laskennallisia arvioita jälkilämpötehosta. Laskennalliset tulokset tulee kuitenkin validoida kokeellisesti, jotta laskentamenetelmän pätevyys voidaan todentaa. Mittaus voidaan suorittaa joko spektroskooppisesti tutkimalla gamma- ja beetasäteilyn spektriä tai kalorimetrisesti mittaamalla tunnetun järjestelmän lämpötilan muutosta. Näistä menetelmistä kalorimetri antaa luotettavamman tuloksen, sillä tulos perustuu puhtaasti kokeelliseen menetelmään. Spektroskooppisessa mittauksessa käytetään laskennallisia kertoimia aktiivisuuden, jälkilämpötehon ja jäähtymisajan riippuvuuksien suhteen.

Laskentamenetelmän validointi tehdään pitkään jäähtyneellä polttoaineella, jotta menetelmällä voidaan arvioida loppusijoitettavan polttoaineen ominaisuuksia. Tällöin mitattava jälkilämpöteho on pieni verrattuna mittausjärjestelmän kokoon. Mittauslaitteen toivottavia ominaisuuksia ovat pieni lämpöhäviö ja -kapasiteetti.

### **1.3 Tavoite**

Työn tavoitteena on löytää käytetyn ydinpolttoaineen jälkilämpötehon mittaamiseen soveltuvan kalorimetrin toimintakonsepti, systemaattisen tuotekehityksen menetelmiä hyödyntäen. Konseptisuunnittelun perustaksi on tehty kirjallisuuskatsaus vastaavissa mittauksissa käytettyihin laitteistoihin. Kehitetyn konseptin soveltuvuus mittauksiin arvioidaan simulointimallin avulla. Simulointimallia varten määritetään kalorimetrin päämitat ja lämpötekniset ominaisuudet. Rakenteen mitoitus perustuu lujuuslaskuihin.

### **1.4 Rajaukset**

Kalorimetri suunnitellaan Loviisan painevesireaktoreissa käytettyjen polttoaineniippujen mukaisesti. Suunnitteluun sisällytetään vain sellaiset rakenteet ja komponentit, joilla on vaikutusta järjestelmän käyttäytymiseen mittauksen aikana. Työn ulkopuolelle rajataan laitteen ohjausjärjestelmä ja mittaustekniikka. Rakennesuunnittelussa huomioidaan kuitenkin komponenttien tilantarve. Tuloksena ei tuoteta yksityiskohtaisia valmistuskuvia tai komponenttien hankintapesifikaatioita.



## 2 Taustaselvitys

### 2.1 Säteily

Säteilyä ei voi ihmisaistein havaita. Tämän vuoksi se herättää monissa tunteita, niin hyvässä kuin pahassa. Säteily on kuitenkin arkipäiväinen asia, eikä siihen liity mystiikkaa. Jotta voisimme ymmärtää käytetyn ydinpolttoaineen ominaisuuksia, on tarpeellista tuntea ydinfysiikan perusteita.

Säteilyturvakeskus (STUK) on julkaissut säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjan ammattikirjallisuudeksi ja kaikille säteilystä kiinnostuneille. Kirjasarja on saatavilla verkkojulkaisuna säteilyturvakeskuksen internet sivustolta. Työn taustaselvityksen apuna on käytetty kirjasarjan ensimmäistä "säteily ja sen havaitseminen" ja viidettä "ydinturvallisuus" osaa. STUK on säteilyturvallisuudesta ja -valvonnasta vastaava viranomainen.

#### 2.1.1 Radioaktiivinen hajoaminen

Radioaktiivisella hajoamisella tarkoitetaan epävakaan atomin ytimen, nuklidin, spontaania muuttumista. Muutosnopeutta kuvataan puoliintumisajalla. Puoliintumisajan kuluttua aineessa tapahtuvien radioaktiivisten hajoamisten määrä on tippunut puoleen alkuperäisestä. Mitä lyhyempi puoliintumisaika on, sitä enemmän hajoamisia tapahtuu ja sitä voimakkaammin aine lähettää säteilyä. Säteily voi olla elektromagneettista tai hiukkassäteilyä, jotka molemmat ovat ionisoivia. Ionisoivalla säteilyllä on riittävästi energiaa aiheuttaakseen muutoksia kohtaamassaan aineessa. Säteily voi esimerkiksi irrottaa elektronin kohtioatomista tai rikkoa molekyylien välisiä sidoksia.

Tärkeimmät hajoamismekanismit ovat alfa- ja beeta-säteily, jotka ovat hiukkassäteilyä. Näiden lisäksi myös neutronisäteily on hiukkassäteilyä. Atomin varaustilojen muutosten yhteydessä voi vapautua myös sähkömagneettista säteilyä. Tällaisia säteilyjä ovat gamma- ja röntgensäteily.

Alfa-hajoamisessa ytimestä irtaantuu kaksi protonia ja neutronia. Säteilyn seurauksena atomin massaluku pienenee neljällä. Säteilyn kantama on lyhyt, ilmassa vain muutamia senttimetrejä. Beeta-hajoamisessa ytimen varaustila muuttuu, mutta massaluku pysyy samana. Hajoamisen seurauksena ytimestä sinkoutuu ulos elektroni tai sen antihhiukkanen, positroni. Beeta-säteilyn kantama ilmassa on muutamia metrejä. Hiukkassäteilyn kantamaan vaikuttaa suuresti niiden sähkövaraus. Alfa-säteilyssä on kaksi positiivisesti varautunutta hiukkasta, joten sillä on voimakkaita vuorovaikutuksia väliaineeseen. Beeta-säteilyssä on yksi varautunut hiukkanen, joten sen sähkövaraus on vain puolet alfa-säteilyn varauksesta.

Neutronisäteily on sähköisesti varautumattomien hiukkasten liikettä, joten sen kantama on pitkä. Neutronisäteily vaimenee nopeimmin kevyissä väliaineissa. Vety on paras väliaine vaimen-



tamaan säteilyä, sillä sen atomiytimien massa on likimain sama kuin neutronin massa. Neutronisäteilyä syntyy mm. ydinreaktoreissa ja hiukkaskiihdyttimissä.

Kaikista läpitunkevinta säteilyä on elektromagneettinen säteily. Sillä on myös kyky olla vuorovaikutuksessa atomin kanssa. Säteilysuojelullisesti elektromagneettinen säteily aiheuttaa suurimmat suojausvaatimukset. Karkeasti jaoteltuna gammasäteily syntyy atomin ytimen varaustilan muutoksista ja röntgensäteily atomin elektronikuorilla tapahtuvista muutoksista. Tästä johdetaan myös erot säteilyjen aallonpituudessa. Gammasäteilyn aallonpituus on lyhyempää, samaa kokoluokkaa ytimen kanssa. Röntgensäteilyn aallonpituus on pitempi ollen atomin kanssa samaa kokoluokkaa. (Ikäheimonen 2002, 11-62)

### **2.1.2 Säteilyn vaikutus aineeseen**

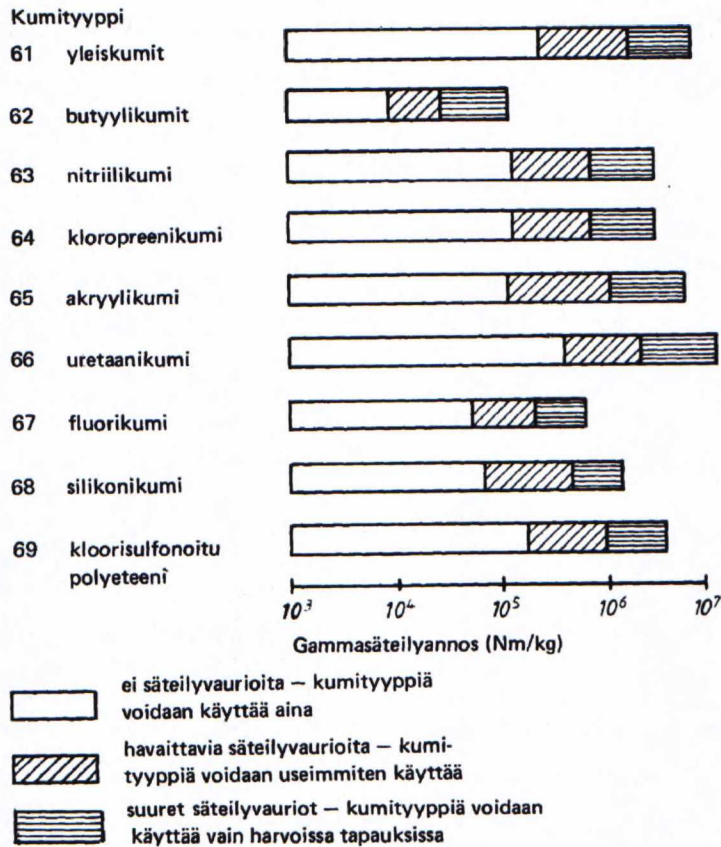
Kuten on jo mainittu, ionisoivalla säteilyllä on kyky vaikuttaa aineeseen. Säteilyn vaikutukset riippuvat monesta eri tekijästä. Tärkeimmät tekijät ovat säteilytyyppi ja väliaine. Eri tyypeillä on eri vaikutusmekanismit ja väliaine ratkaisee mitkä mekanismeista on merkittävimmät.

Hiukkassäteily menettää energiaansa vuorovaikutuksessa väliaineeseen kanssa. Hiukkaset voivat törmäillä atomin ytimiin tai muuttaa suuntaansa sähköisten tai ydinvoimien seurauksena. Hiukkaset menettävät energiaa, joka siirtyy muualle energian säilymislain mukaan. Siirtynyt energia vaikuttaa kohtioatomien varaustilaan tai muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi.

Sähkömagneettinen säteily voi olla vuorovaikutuksessa atomin sähkömagneettisen- tai ydinvoiman kanssa. Vaikutuksen seurauksena säteily voi siroutua tai absorboitua kohteeseen. Korkeaenerginen säteily voi irrottaa nukleonin atomin ytimeä, mutta yleensä se on vuorovaikutuksessa elektronien kanssa.

Sähkömagneettinen säteily vaikuttaa siis kohtaamansa atomin varaustilaan, mutta se ei tee siitä radioaktiivista. Materiaalin muuttamiseksi radioaktiiviseksi tarvitaan neutronisäteilyä ja -kaappauksia. Neutronikaappauksessa nuklidi sitoo itseensä vapaan neutronin, jolloin sen massaluku kasvaa. Se, mitä tämän jälkeen tapahtuu, riippuu alkuaineesta ja sen isotoopista. Esimerkiksi lyijyä raskaammilla alkuaineilla ei ole stabiileja muotoja. Neutronit menettävät nopeuttaan sirotessaan kohtioatomista. Tällöin osa liike-energiasta siirtyy sirottavan ytimen liike-energiaksi. Tämä liike-energia on yleensä suuri verrattuna atomien sidosenergioihin. Tämän seurauksena metalleissa voi syntyä hilavirheitä ja kemiallisten sidosten katkeamisia orgaanisissa aineissa. (Ikäheimonen 2002, 53)

Kumien muutoksia gammasäteilyssä on esitetty standardissa SFS 3552. Säteilynkestävyys on määritetty standardin ASTM D 1672-66 mukaan. Kuvassa 1 on esitetty joidenkin kumilaatujen säteilynkestävyys.



**Kuva 1. Gammasäteilyn aiheuttamat säteilyvauriot kumiin (SFS 3552, 15).**

Kumityypeillä on huomattavia eroja gammasäteilyn kestävyudessa. Kuvan vaaka-akselin arvot kasvavat logaritmisesti, joten yhden pykälän nousu annoksessa vastaa säteilymäärän 10-kertaista kasvamista. Metalleihin verrattuna kumit kestävätkin huonosti säteilyä. Tämän takia niitä ei tulisi käyttää kohteissa, joissa materiaalin vaurioituminen johtaa vaaratilanteeseen.

### 2.1.3 Fissio

Fissiossa raskas atomiydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi neutronin osuman seurauksena. Prosessissa vapautuu muutamia uusia neutroneita, jotka voivat aiheuttaa lisää halkeamisia. Sopivissa olosuhteissa vapautuneet neutronit aiheuttavat saman verran uusia fissioita kuin edellinen sukupolvi. Tällöin ydinreaktioiden määrä pysyy vakiona ja tilannetta sanotaan kriittiseksi. Mikäli neutronit aiheuttavat enemmän halkeamisia kuin edellinen sukupolvi, on tilanne ylikriittinen. Laskevaa fissioiden määrää sanotaan alikriittiseksi reaktioksi. (Sandberg 2004, 26-28)

Ydinvoimalaitoksessa fissiota hallitaan säätämällä neutronien määrää. Yleensä säätö tehdään liikuteltavilla säätösauvoilla, joissa on neutroneita absorboivia booriterässauvoja. Fissiossa vapautuneiden neutronien liikenoisuus on niin suuri, että ilman niiden hidastamista ne karkaisivat



ulos reaktorin sydäimestä. Hidastimena, eli moderaattorina, käytetään vettä koska se hidastaa tehokkaasti neutroneita ja se absorboi vain vähän neutroneita. Veden käyttöä puoltaa myös muut sen ominaisuudet: se ei syty, ei ole myrkyllistä eikä aktivoidu säteilystä ja se kuljettaa lämpöä tehokkaasti. Lisäksi vesi on halpaa ja sitä on helposti saatavilla. (Sandberg 2004, 28-39)

Halkeamiskelpoisia atomiytimiä kutsutaan fissiileiksi. Ydinreaktoreihin soveltuvat fissiilit aineet ovat  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  ja  $^{239}\text{Pu}$ . Näistä vain  $^{235}\text{U}$  esiintyy luonnossa, kun muut aineet ovat keinotekoisesti valmistettuja. Toinen fission kannalta tärkeä aineryhmä on fertiilit ytimet. Fertiilit aineet muuttuvat fissiileiksi neutronikaappauksen seurauksena. Tärkeimpiä fertiilejä aineita ovat uraanin isotooppi  $^{238}\text{U}$  ja toriumin isotooppi  $^{232}\text{Th}$ . Ydinvoimalaitoksen tehosta useita prosentteja on tuotettu fertiilistä fissiiliksi muuttuneilla ytimillä. (Sandberg 2004, 27)

## 2.2 Ydinpolttoaine

Ydinvoimalaitoksen polttoaineelta vaativat ominaisuudet vaihtelevat voimalaitostyyppin mukaan. Voimalaitostyyppit voidaan jakaa moderaattorin ja jäähdytteen mukaan seuraaviin tyyppeihin: Kevytvesi-, grafiitti-, raskasvesi- ja kaasujäähdytteisiin reaktoreihin. Näistä tarkastellaan kevytvesireaktorin polttoainetta, koska tämä on yleisin reaktorityyppi ja tutkittavat polttoaineet ovat kevytvesireaktorin polttoainetta. Kevytvesi on tavallista vettä, mutta tällä ilmaisulla halutaan korostaa eroa raskaaseen veteen. Tästä eteenpäin puhuttaessa polttoaineesta tarkoitetaan kevytvesireaktorin ydinpolttoainetta, ellei muuta erikseen mainita.

Uraanimalmia käytetään polttoainemateriaalin raaka-aineena kevytvesireaktoreissa. Uraani on suhteellisen yleinen alkuaine, jota maankuoressa esiintyy keskimäärin 4 grammaa ja merivedessä 3 milligrammaa tonnissa (Hyvä tietää Uraanista 2006, 7). Luonnonuraanissa on noin 0,7 % halkeamiskelpoista isotooppia  $^{235}\text{U}$  ja polttoaineeksi rikastetussa uraanissa isotoopin osuus vaihtelee välillä 3-5 %.

### 2.2.1 Polttoaineen kierto

Polttoainekierto voi olla avoin tai suljettu sen jälleenkäsittelytavan mukaan. Suljetussa kierrossa käytetystä polttoaineesta erotetaan halkeamiskelpoiset aineet, jotka sitten hyödynnetään uuden polttoaineen valmistuksessa. Menetelmällä saadaan noin viidenneksen vähennys tarvittavan uraanimalmin määrään (Sandberg 2004, 285). Tällä saavutettava säästö on kuitenkin pieni verrattuna kustannuksiin, joten sen käyttö rajoittuu maihin joilla on oma jälleenkäsittelylaitteisto.

Avoimessa kierrossa polttoaine loppusijoitetaan sellaisena, kuin se tulee ulos reaktorista. Polttoainetta säilytetään ja jäähdytetään kymmeniä vuosia ennen sulkemista loppusijoitustilaan. Eri-laisia loppusijoitusvaihtoehtoja on suunniteltu tehtäväksi maan alle louhittaviin tiloihin, syviin porakuiluihin ja merenpohjan sedimentteihin. Nykyisen käsityksen mukaan louhitut tilat ovat paras ratkaisu loppusijoittamiseen. Tätä on perusteltu olosuhteiden pitkäaikaisella vakaudella,

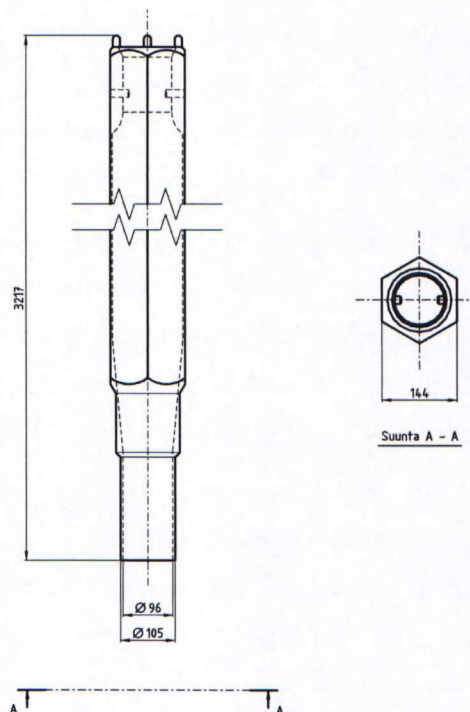


moninkertaisilla leviämisseillä ja polttoaineen palautusmahdollisuudella. (Sandberg 2004, 291-292)

## 2.2.2 Polttoaineen rakenne

Polttoaineena käytettävä uraani jalostetaan keraamiseksi uraanioksidiksi, jonka jälkeen se sint-rataan eli puristetaan korkeassa lämpötilassa pieniksi sylinterimäisiksi napeiksi. Napit asetetaan kaasutiiviiseen zirkonium-pohjaisesta metalliseoksesta valmistettuun putkeen eli polttoainesauvaan. Polttoainesauvan rakenteen tarkoituksena on muodostaa peräkkäisiä esteitä, jotka pysäyttävät radioaktiivisten aineiden leviämisen. Polttoainenappi estää fission tuotteiden liukenemisen ympäristöön. Sauva estää fissiokaasujen leviämisen sauvan ulkopuolelle sekä muodostaa rakenteen mekaanisen lujuuden.

Polttoainesauvat kootaan polttoainenipuiksi jo valmistuslaitoksella. Yksi nippu koostuu lukuisista polttoainesauvoista ja voi sisältää satoja kiloja uraania. Esimerkiksi Loviisan voimalaitoksella käytettävät polttoaineniput sisältävät 126 sauvaa ja 120 kg uraania (STUK 2012). Kuvassa 2 käsitellään vastaavan tyyppistä polttoainenippua.



**Kuva 2. VVER-440 tyyppisen reaktorin polttoainenippu (NEA 2008, 11; PLK 1981).**

Tutkittavat polttoaineniput ovat kuusikulmaisia, jonka samansuuntaisten tahkojen väli on 144 millimetriä. Polttoainenippu on pyöreä alaosaan halkaisijan ollessa 105 millimetriä. Nipun sisällä kulkevan jäähdytyskanavan halkaisija alaosassa on 96 millimetriä. Polttoaineen kokonaiskorkeus on 3217 millimetriä. (PLK 1981)

### 2.2.3 Muutokset fissiossa

Polttoaineen muutokset ydinreaktiossa tapahtuvat atomitasolla. Muutokset syntyvät fission, neutronikaappauksen tai radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Fissiossa fissiili eli halkeamiskelpoinen ydin ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  tai  $^{239}\text{Pu}$ ) hajoaa kahdeksi kevyemmäksi ytimeksi neutronin osuessa siihen. Hajoamisessa vapautuu uusia neutroneita, jotka voivat puolestaan aiheuttaa lisää fissioita.

Neutronikaappauksessa ydin kaappaa neutronin, muuttuen saman alkuaineen raskaammaksi isotoopiksi. Syntynyt isotooppi on usein epävakaa ja muuttuu näin radioaktiiviseksi. Esimerkiksi luonnonuraanin yleisin isotooppi  $^{238}\text{U}$ , mistä myös polttoaine pääosin koostuu, muuttuu neutronikaappauksen seurauksena isotoopiksi  $^{239}\text{U}$ . Uusi ydin on hyvin epävakaa ja muuttuu radioaktiivisten  $\beta$ -hajoamisten seurauksena plutoniumin fissiiliksi isotoopiksi  $^{239}\text{Pu}$ .

### 2.2.4 Käsittely

Polttoaineen käsittelyvaatimukset muuttuvat ratkaisevasti sen mukaan onko kyse polttoainekierroksen alku- vai loppupäästä. Kierron alkupää kattaa vaiheet ennen reaktoriin sijoittamista ja loppupää vastavasti vaiheet reaktorista poiston jälkeen. Kierron alkupäässä polttoaine on vain lievästi aktiivista, eikä sen käsittelyssä tarvita säteilysuojelua. Tärkein turvallisuustoimenpide on estää polttoaineen tuleminen kriittiseksi. Tällaisen ydinketjureaktion syntymisen mahdollisuus liittyy tilanteisiin, missä tiiviisti pakattu polttoaine joutuu veden ympäröimäksi.

Reaktorista poiston jälkeen suojausvaatimukset nousevat huomattavasti polttoaineeseen kertyneiden fissio- ja aktivoitumistuotteiden seurauksena. Käytetyn polttoaineen aktiivisuus on huipussaan heti reaktorista poiston jälkeen. Tällöin myös polttoaineen jäähdyttäminen on välttämättöntä sulamisen estämiseksi. Muutamassa vuodessa polttoaine aktiivisuus laskee siten, ettei sen sulaminen ole mahdollista, vaikka se joutuisi kuivaan tilaan (Sandberg 2004, 85).

Käytetty polttoaine säilytetään vesialtaassa aina loppusijoitukseen saakka. Vaikka vettä ei tarvita kuin tuoreimpien polttoaineiden jäähdyttämiseen, toimii se tehokkaana säteilysuojana. Vesi on luonnollinen valinta, sillä myös reaktorissa käytetty väliaine on vettä. Loviisan voimalaitoksella käytetyn polttoaineen varastoinnissa suunnitteluperuste on, että niiden päällä on oltava jatkuvasti vettä vähintään 3,5 m (Mayer 2009, 11).

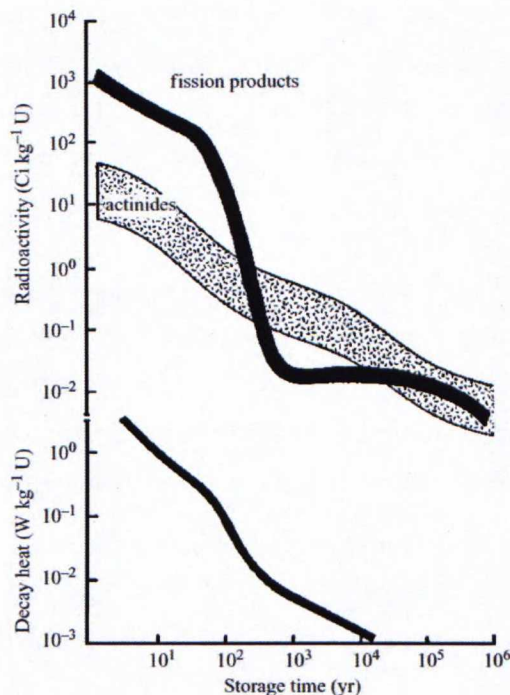
### 2.2.5 Palama ja jälkilämpö

Palamalla kuvataan polttoaineella tuotetun energian kokonaismäärää eli fissioituneen uraanin osuutta. Palaman yksikkö on MWd/kgU (megawattipäivä/uraani kilogramma). 10 MWd/kgU vastaa 1 % suuruista fissioitumista alkuperäisen uraanin määrässä. (Olander 2001, 7). Kevyt-vesireaktoreilla polttoaineen palama on yleensä välillä 30–40 MWd/kgU. Palamaa voidaan ko-



rottaa käyttämällä korkeammin rikastettua polttoainetta, nostamalla aksiaalista lämpötehoa ja/tai jatkamalla käyttöjakson pituutta. Palaman kasvattamista rajaavat materiaalitekniset ja ketjureaktion hallinnan haasteet.

Jälkilämpö syntyy epävakaiden atomien hajoamisen seurauksena. Eri aineilla on yksilöllinen puoliintumisaika ja hajoamismekanismi. Jälkilämpö on voimakkainta heti ydinreaktion päätyttyä, jolloin lyhyen puoliintumisajan omaavat aineet vastaavat suurimmalta osin jälkilämmön tuotosta. Kuvaan 3 on piirretty polttoaineen aktiivisuus ja jälkilämmön tuotanto. Jokaisessa fissiossa syntyy kaksi halkeamistuotetta ja ne ovat alkuaineita välillä germanium - dysprosium. (Matzke 2001, 1). Neutronikaappauksen ja beeta-hajoamisen kautta syntyvät uraania raskaammat alkuaineet eli aktinoidit. Näillä on huomattavan pitkä puoliintumisaika, joten radioaktiivisuus laskee hitaasti.



**Kuva 3. Käytetyn polttoaineen radioaktiivisuus ja jälkilämpöteho (Matzke 2001, 1).**

Kuvaan ei ole piirretty tapahtumia heti reaktorista poiston jälkeen, sillä tällöin pääosa jälkilämmöstä syntyy lyhyen puoliintumisajan omaavien aineiden hajoamisen seurauksena ja on huomattavan suurta. Esimerkiksi vuoden toimineen reaktorin jälkilämpöteho heti pysäyttämisen jälkeen on noin 7 % käyttötehosta, tunnin päästä 1,3 % ja kuukauden päästä 0,1 %. (Sandberg 2004, 40)



Kuva on jokseenkin mittaustapahtumaa vastaavasta polttoaineesta. Kun polttoainenipussa on uraania 120 kg, niin 10 vuoden jäähtymisajalla jälkilämmöksi saadaan noin 120 W. Fission tuotteet vastaavat pääosin jälkilämpötehosta ensimmäiset 200 vuotta. Tarkemmat arvot on kuitenkin määritettävä polttoainekohtaisilla laskuilla.

## **2.3 Jälkilämmön mittauksessa käytetyt menetelmät**

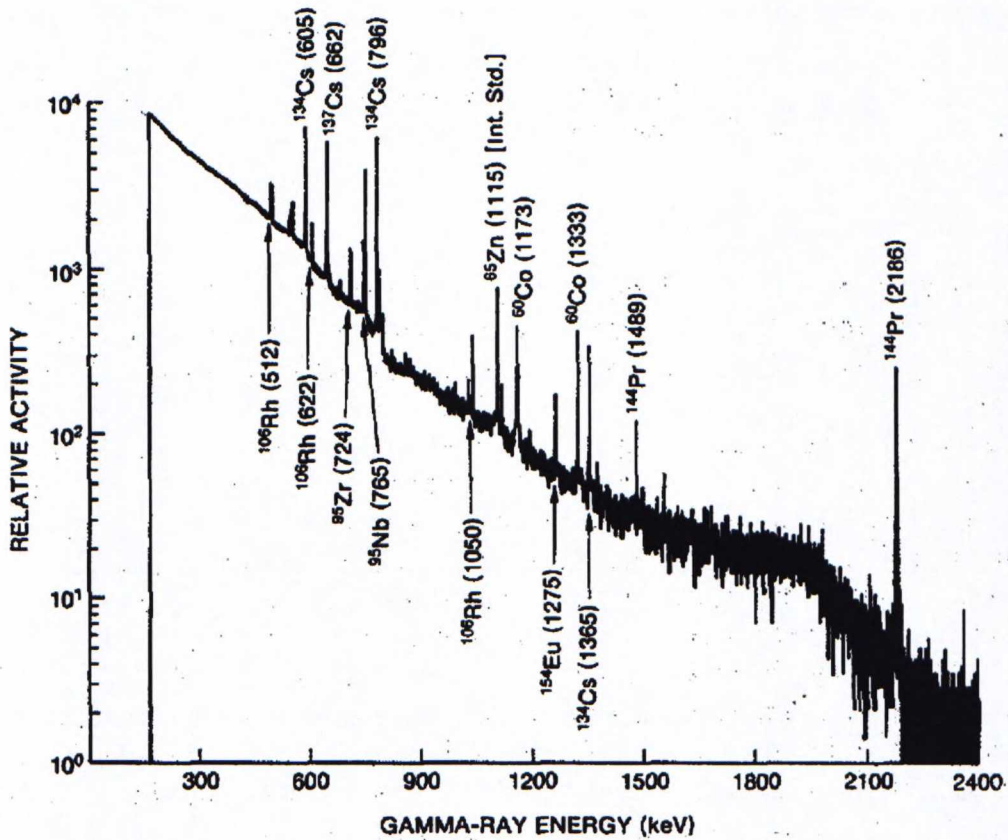
Käytetyn polttoaineen jälkilämmön mittaaminen on haastava tehtävä. Polttoainenippu on kotoitettu siten, että yksittäisen polttoainesauvan mittaaminen on lähes mahdotonta. Vaikka yksittäinen sauva voitaisiin mitata, on niitä kymmenittäin yhdessä nipussa. Lisäksi sauvassa oleva uraani, mistä myös jälkilämpö tulee, on pinottu lähes 2,5 m korkuiselle alueelle. Polttoaine myös säteilee voimakkaasti, mikä rajaa käsin tehtävät mittaukset mahdottomiksi. Onkin syytä käyttää menetelmää, jolla saadaan luotua kokonaiskuva polttoainenipusta kaukokäyttöisesti.

Tähän tarkoitukseen on kehitetty kaksi toisistaan poikkeavaa menetelmää, spektrometrinen ja kalorimetrinen mittaus. Spektrometrillä mittauksella mitataan säteilyn spektri, jolloin sen radioaktiiviset aineet saadaan selville. Aineiden määrällä ja palamalla on riippuvuus, minkä avulla jälkilämpöteho voidaan määrittää. Kalorimetrillä mittauksella mitataan lämpötehoa epäsuorasti. Mittaukset tehdään vedestä, joka on kulkenut polttoaineen läpi.

### **2.3.1 Spektrometrinen mittaus**

Spektrometrillä mittauksella voidaan selvittää polttoainenipun säteilyaktiivisuus. Menetelmä on suhteellisen yksinkertainen ja nopea. Säteilyaktiivisuus ei kuitenkaan kerro suoraan jälkilämpötehoa, vaan se on ratkaistava laskennallisesti. Lisäksi spektrometrisessä tutkimuksessa voidaan tarkastella kerrallaan vain pistemäistä kohdetta. Polttoainenipun ollessa epäsymmetrinen ja palaman vaihdellessa nipun eri osissa, on kokonaiskuvan saaminen haasteellinen tehtävä.

Gammaspektrometri on yleinen menetelmä aktiivisuusmittauksissa. Menetelmällä voidaan havaita tutkittavan kappaleen gammasäteilyn energiajakauma, missä eri nuklideilla on yksilöllinen energiapiikki. Esimerkki gammaspektrometrillä saadusta energiajakaumasta on kuvassa 4.



Kuva 4. Käytetyn polttoaineen säteilyspektri (Phillips 1991, 534).

Kuvan tutkimuskohteena on ollut 32 GWd/tU palaman polttoainenippu, jonka jäähtymisaika reaktorista poiston jälkeen on 9 kk. Huomioitavaa on, että uraani ja plutonium eivät aiheuta havaittavaa piikkiä energijakaumaan. Tämä johtuu niiden vähäisestä gamma-aktiivisuudesta verrattuna lyhyen puoliintumisaajan omaaviin nuklideihin. Polttoaineessa jäljellä olevan uraanin ja plutoniumin määrä onkin selvitetävää epäsuorasti niiden hajoamistuotteiden määrän kautta. Polttoaineen palama voidaan määrittää nuklidien  $^{134}\text{Cs}$  ja  $^{137}\text{Cs}$  suhteella (Phillips 1991, 542). Tuntemalla palama, rikastusaste ja jäähtymisaika, voidaan uraanin ja plutoniumin määrä päätellä, sillä 10 MWd/kgU vastaa 1 % suuruista fissioitumista alkuperäisen uraanin määrässä.

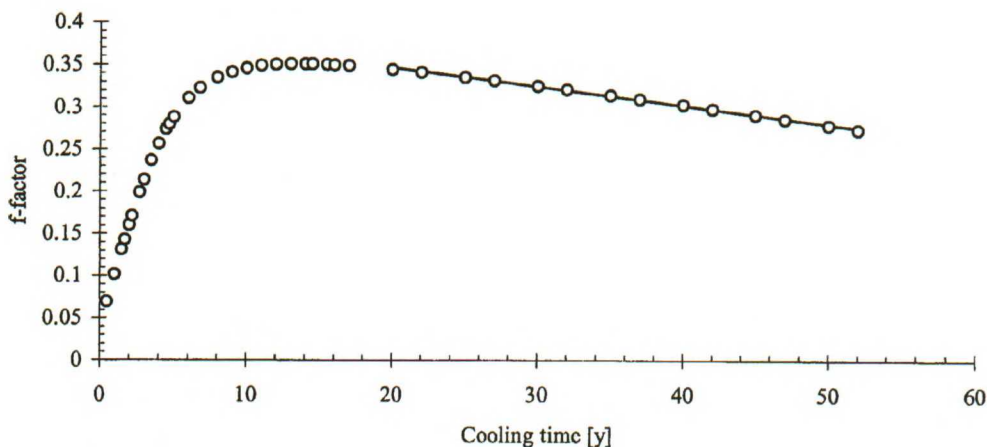
Agrenius ja Vogt ovat esittäneet, että  $^{137}\text{Cs}$  aktiivisuudella on suora yhteys polttoaineen jälkilämpötehoon (Agrenius & Vogt 1998, 13–14). Teho voidaan määrittää kaavalla

$$P = C \frac{I}{f}, \quad (1)$$

missä  $P$  on lämpöteho,  $C$  on polttoaineen geometriasta riippuva kerroin,  $I$  on mitattu  $^{137}\text{Cs}$  gammasäteily intensiteetti ja  $f$  on  $^{137}\text{Cs}$  tuottaman jälkilämmön suhde kokonaislämpötehoon. Kerroin  $f$  on riippuvainen monimutkaisesti polttoaineparametreista, kuten palamasta, jäähty-



misajasta, rikastusasteesta ja käyttöhistoriasta. Kerroin määritetään laskennallisesti, mutta Agrenius ja Vogt ovat osoittaneet, että pitämällä muut muuttujat vakiona voidaan  $f$  ilmoittaa jäähtymisajan funktiona yli 12 vuoden jäähtymisajoilla (1998, 14). Kertoimen  $f$  suhde jäähtymisaikaan on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.**  $^{137}\text{Cs}$  tuottaman jälkilämpötehon suhde kokonaislämpötehoon (Agrenius & Vogt 1998, 14).

Routamon ja Toppilan mukaan polttoaineen  $^{137}\text{Cs}$  aktiivisuus lisääntyy palaman funktiona (2007). Jälkilämpötehon ja  $^{137}\text{Cs}$  aktiivisuuden suhteen minimiarvo on noin 15 vuoden jäähtymisen jälkeen, jonka jälkeen suhde pysyy lineaarisena. Agreniuksen ja Vogtin määrittämä kerroin  $f$  seuraa myös tätä suhdetta. Kuitenkin  $^{137}\text{Cs}$  aktiivisuus todentaa vain polttoaineen palaman, joten nipun jälkilämpöteho jää laskennallisen kertoimen  $f$  varaan. Näin ollen tällä menetelmällä ei voida todeta laskentamenetelmän oikeellisuutta.

### 2.3.2 Kalorimetrinen mittaus

Kalorimetri on laite, jolla mitataan kappaleen tai kemiallisen reaktion lämpömäärää tai -tuottoa. Tutkimuksen kohde asetetaan lämpöeristetyn astian sisään, jonka jälkeen mitataan astian sisälämpötilan muutosta. Menetelmän suurin haitta on tuntematon lämpövuoto laitteen sisältä ulkopuolelle. Tämän vuoksi kalorimetrin hukkalämpövuoto täytyy määrittää ennen mittausten aloittamista.

Lämpövuoto kuvaa seinämän läpi siirtyvän lämpöenergian määrää. Energia voi siirtyä kolmella eri tavalla: konvektiolla, johtumalla ja säteilemällä. Konvektiossa lämpö siirtyy virtaavan nesteen tai kaasun mukana. Konvektiossa siirtyvä lämpöenergia on

$$\Phi_{\text{konvektio}} = q_m c \Delta T, \quad (2)$$



jossa  $q_m$  on aineen massavirta,  $c$  on aineen ominaislämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  on lämpötilan muutos (Valtanen 2010, 229). Johtumalla lämpö kulkee seinämän tai eristekerroksen läpi. Johtumalla siirtyvä lämpöenergia on

$$\Phi_{\text{johtuminen}} = \lambda A \frac{\Delta T}{l}, \quad (3)$$

missä  $\lambda$  on lämmönjohtavuus,  $A$  on pinta-ala,  $\Delta T$  on lämpötilan muutos ja  $l$  on eristekerroksen paksuus (Valtanen 2010, 230). Säteilemällä siirtyvä lämpöenergia on

$$\Phi_{\text{säteily}} = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

jossa  $\varepsilon$  on pinnan emissiivisyys,  $\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio,  $A$  on pinta-ala,  $T$  on kappaleen lämpötila ja  $T_0$  on ympäristön lämpötila (Valtanen 2010, 231). Konvektiossa ja johtumalla siirtyvän lämmön määrä on suoraan verrannollinen seinämän yli vaikuttavaan lämpötilaeroon.

Kalorimetrin lämpövuota voi pienentää estämällä vuodot laitteesta, kasvattamalla eristepaksuutta sekä valitsemalla huonosti lämpöäjohtavan ja pienen emissiivisyyskertoimen materiaalit. Lisäksi pitämällä lämpöä sitovat massat pienenä, saadaan järjestelmä toimimaan nopeasti myös pienillä lämpötehoilla.

Kalorimetrin mittausmenetelmän etuna on se, että koko tutkittava kappale on mittalaitteen sisällä. Tällöin koko kappale osallistuu muutokseen. Muutokseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat mm. ominaislämpökapasiteetti ja massa. Nämä vaikuttavat muutosnopeuteen, ei lopulliseen tasapainolämpöön.

Mittauslaite täytyy kalibroida, jotta mittauksista saadaan tarkkoja ja luotettavia. Kalibroinnin tarkoituksena on määrittää mittalaitteen virheen suuruus. Luotettavuuden kannalta on tärkeää, että kalibrointiolosuhteet muistuttavat mahdollisimman paljon mittauksen todellisia olosuhteita.

Kalorimetrin menetelmän haittana on, ettei se huomioi säteilynä karkaavaa tehoa. Tätä varten laitteiston ulkopuolella on oltava useita säteilyn mittauspisteitä tai liikuteltava mittauslaite. Lisäksi mittausjärjestelmästä tulee suhteellisen suurikokoinen, jolloin pienen lämpötehon omaavan polttoaineen mittaus kestää pitkään.

## 2.4 Kalorimetrisissä mittauksissa käytetyt laitteistot

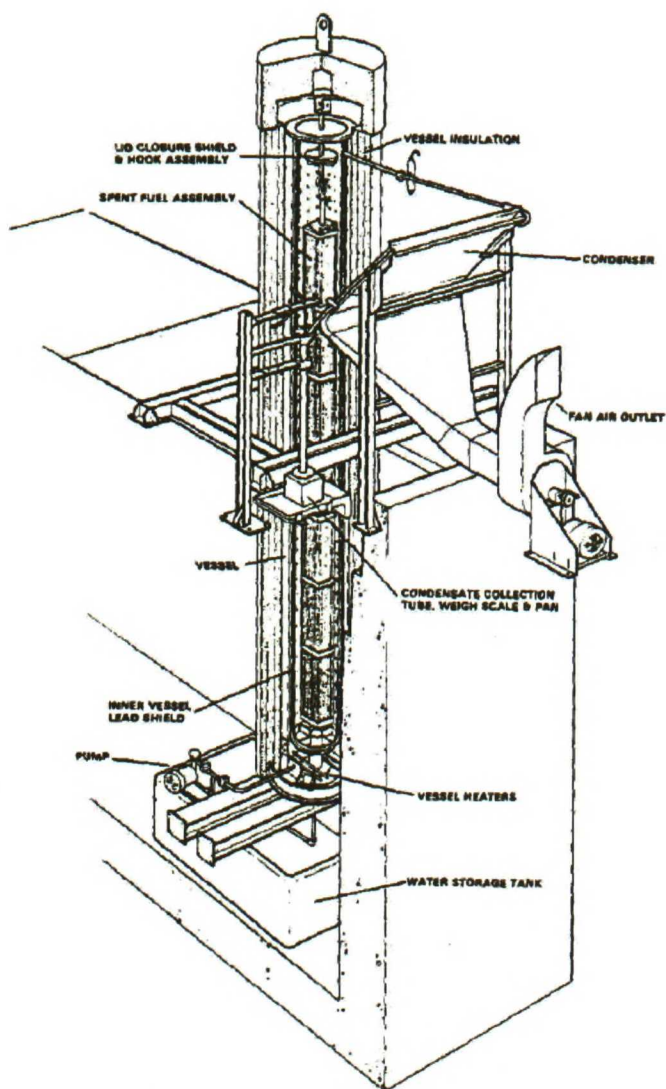
Suunnittelun lähtötietoja hakiessa on hyödyllistä kartoittaa alan aikaisemmat laitteistot. Analysoimalla laitteet tarkasti saadaan kuva alan teknisestä tasosta. Tällöin vältetään muiden tekemät virheet ja voidaan keskittyä kehittämään laitetta aikaisempaa pitemmälle.

Ensimmäiset kalorimetriset mittaukset on tehty Yhdysvalloissa 1980-luvun alussa. Tätä ennen on mitattu yksittäisten polttoainesauvojen jälkilämpötehoa, mutta ei kokonaisten polttoainenip-

pujen. Ydinpolttoaineen mittaukseen käytettävissä kalorimetreissä on tapahtunut kehitystä joko-  
kaisen mallisukupolven jälkeen. Tässä kappaleessa esitellään kolme erilaista kalorimetriä.

### 2.4.1 Hanford Engineering Development Laboratory

Yhdysvalloissa Nevadassa on rakennettu kuvan 6 mukainen kalorimetri, jolla voidaan mitata  
polttoaineen jälkilämpötehoa. Mitattava lämpöteho on välillä 0,1 - 2,5 kW. Mittausten tarkkuu-  
deksi on arvioitu  $\pm 5\%$  yli 1000 W ja  $\pm 10\%$  100 W lämpötehoille. Kalorimetri koostuu kah-  
desta sisäkkäisestä lieriöstä, jotka on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Sisempään lieri-  
öön on kiinnitetty lyijysuojia estämään tehon karkaamisen gammasäteilynä. (Aissa 2010b, 19-  
20)



Kuva 6. HEDL kalorimetri (Aissa 2010b, 20).

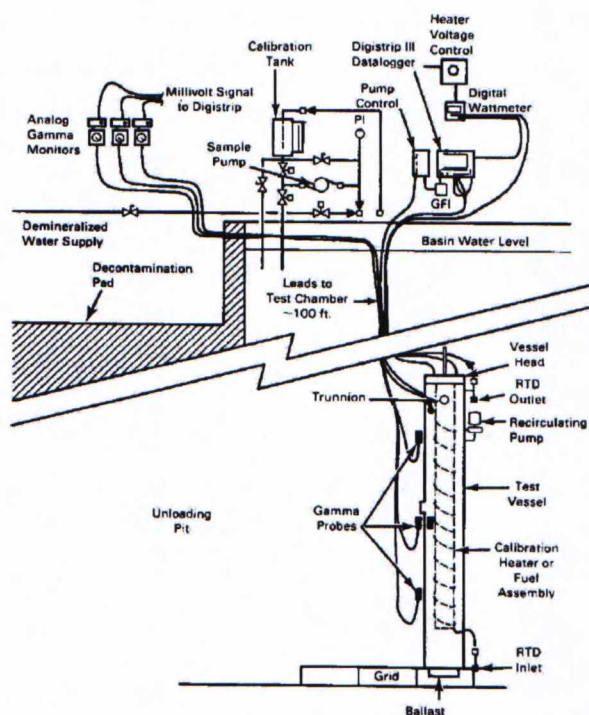


Mittauksen lähtötilanteessa kalorimetrissä oleva vesi lämmitetään kiehumispisteeseen tunnetun lämpövastuksen avulla. Höyrystynyt vesi lauhdutetaan vedeksi, josta mitataan höyryntuoton tasapainopiste. Tämän jälkeen polttoaine tuodaan kalorimetriin ja mitataan uusi höyryntuoton tasapainopiste. Näiden tasapainopisteiden välisestä erosta saadaan pääteltyä polttoaineen jälkilämpöteho. Kalorimetri on sijoitettu kokonaisuudessaan kuivavarastoon, missä mittauksessa tarvittava vesi lisätään kalorimetriin. (Aissa 2010b, 19–20)

Laitteen toimintaperiaate on mielenkiintoinen, mutta se ei sovellu työn aiheena olevaan ongelmaan. Loviisan voimalaitoksella käytetyn polttoaineen käsittelyn perustana on vaatimus, että sen päällä on jatkuvasti vähintään 3,5 m vettä.

## 2.4.2 GE-Morris Operation

General Electric:n Morriksen laitoksella on tehty veden pinnan alapuolisia jälkilämpötehomittauksia. Käytetty kalorimetri on sijoitettu polttoainealtaan pohjalle, missä myös mittaukset suoritetaan kuvan 7 mukaisilla järjestelyillä. Laite koostuu kahdesta sisäkkäisestä lieriöstä, joiden välissä on uretaanivaahtoeriste. Polttoaine lisätään kalorimetriin avattavan kannen kautta, jonka tiiveys tarkastetaan painekokeen avulla. Laitteessa on vaihdettavat sisäosat erityyppisiä polttoaineita varten. (Aissa 2010b, 21–23)



Kuva 7. GE-Morris operation kalorimetri (Aissa 2010b, 22).

Laitteistolla on suoritettu mittauksia kahden erilaisen toimintaperiaatteen avulla. Staattisessa mittauksessa kalorimetrin sisältävän veden lämpötilan annetaan nousta vapaasti. Muutosnopeut-

ta verrataan kalibrointikäyriin, jotka saadaan mittaamalla tunnetun lämpövastuksen aiheuttamaa lämpötilanousua. Kierrätysmittauksessa vettä pumpataan kalorimetrin läpi ja mitataan sisään menevän ja ulos tulevan virtauksen lämpötilaeroa. Tätä menetelmää käytettiin vähemmän, sillä se todettiin epäluotettavammaksi kuin staattinen mittaus. (Aissa 2010b, 21–23)

Mittauksessa käytettiin platinavastusantureita, joita oli sijoitettu useisiin eri mittauspisteisiin. Näitä pisteitä oli mm. kalorimetrin sisällä olevassa polttoainetelineessä, astian seinämissä ja virtauskanavissa. Kalorimetrin ulkopuolella oli gamma-anturit mittaamassa uloskarkaavan säteilyn määrää. Mittausvirheeksi arvioitiin  $\pm 2 \%$  700 W ja  $\pm 4 \%$  200 W lämpöteholle. Satunnaisvirheen suuruudeksi mitattiin  $\pm 4,3 \%$  noin 300 W lämpötehon toistomittausten avulla. (Aissa 2010b, 21–23)

Mittausperiaatteet ovat GE-Morrisin laitteessa jo hyvin kehittyneitä. Toisen sukupolven laitteistossa mittaukset on tehty vedenpinnan alapuolella suljetusta nestekierrosta. Lisäksi laitteistossa on luovuttu raskaista lyijysuojista ja korvattu nämä gammavuon mittauslaitteilla. Laitteiston toteutuksesta on niukasti tietoa, joten mekaaniseen suunnitteluun ei tästä ole hyötyä.

### 2.4.3 Swedish Central Interim Storage Facility (CLAB)

Ruotsin käytetyn polttoaineen keskusvarastossa (CLAB) on mitattu käytetyn polttoaineen jälkilämpötehoa. Mittauksiin on käytetty kalorimetriä, jonka omistaa Ruotsin ydinjätteistä huolehtiva yhtiö SKB. Mitatut polttoaineet ovat olleet kiehutus- ja painevesireaktorin polttoainetta lämpötehon vaihdellessa 50...1000 W välillä. (Sturek & Agrenius 2006, 11–17)

Mittaukset on tehty veden pinnan alapuolella, kuvan 8 mukaisella kalorimetrillä. Kalorimetri on 5 m korkea ja koostuu kahdesta sisäkkäisestä sylinteristä. Sisemmän sylinterin halkaisija on 0,33 m ja sisäkorkeus on 4,5 m. Sylintereiden välitila on täytetty polyuretaanivaahdolla, jotta lämmönsiirtyminen seinämien välillä olisi mahdollisimman pieni. (Sturek & Agrenius 2006, 11–17)

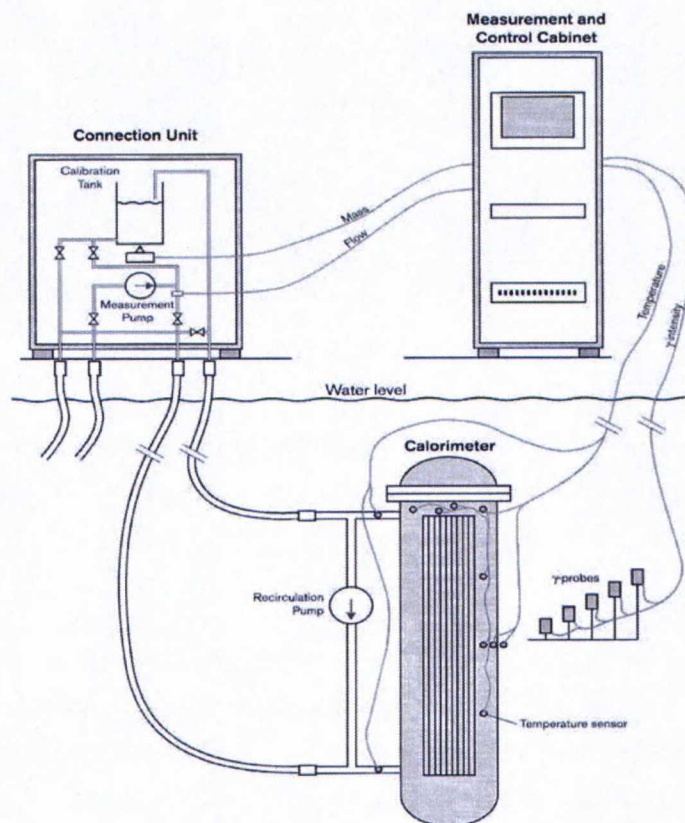
Polttoaine tuodaan mittalaitteeseen erillisellä käsittelylaitteistolla. Kalorimetrin kannen avaus, sulkeminen ja lukitseminen tapahtuvat paineilman avulla. Perustilassa laitteella voidaan mitata vain painevesireaktorin polttoainetta. Mitattaessa kiehutusvesireaktorin polttoainetta, täytyy laitteeseen kiinnittää lisäohjain. Ohjaimen tarkoituksena on keskittää polttoaine kalorimetrin keskelle ja pitää se pystyasennossa. (Sturek & Agrenius 2006, 11–17)

Jäähdytteen kierrättämiseen käytetään keskipakoispumppua, jonka tuotto on 60 l/min. Täyttöpumpun virtausta voidaan säätää välillä 0-20 l/min. Täyttöpumpun tuotto mitataan virtausmittarilla, joka voidaan kalibroida laitteistossa olevan kalibrointitankin avulla.



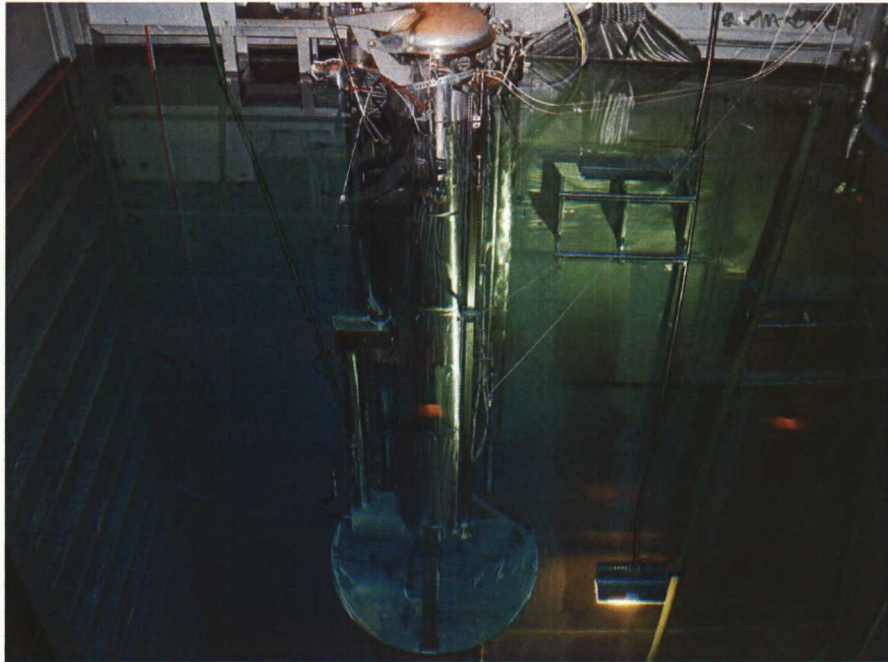
Lämpötilan mittaus tehdään 16 eri paikasta käyttäen PT-100 lämpötila-antureita. Kahdeksan niistä mittaa laitteiston sisälämpötilaa, kaksi sisään tulevan ja ulos menevän virtauksen lämpötiloja. Loput mittaavat sisä- ja ulkovaipan lämpötilaa. (Sturek & Agrenius 2006, 11–17)

Kalorimetrin ulkopuolella on viisi säteilymittaria, joilla mitataan ulos tulevan gammasäteilyn voimakkuutta. Mittarit on asennettu viidelle eri etäisyydelle ulkopinnasta ja niitä voi siirtää aksiaalisesti kymmeneen kiinteään asemaan ja kääntää 90° kalorimetrin ympärillä. (Sturek & Agrenius 2006, 11–17)



**Kuva 8. CLAB:n Mittauslaitteiston periaatekuva (Sturek & Agrenius 2006, 12).**

Laitteiston kalibrointiin käytetään sähkölämmittintä, joka on suunniteltu polttoainepipin muotoiseksi. Venttiilien ja pumppujen ohjaamiseen sekä tiedonkeräämiseen käytetään PC-pohjaista ohjausjärjestelmää. Kuvassa 9 on esitetty Ruotsin käytetyn polttoaineen varastossa oleva kalorimetri.



**Kuva 9. CLAB:n kalorimetri (Aissa 2010a, 5).**

CLAB:n laitteiston toteutuksessa on selvästi hyödynnetty GE-Morriksen laitteiston kokemuksia. Mittausmenetelmää ja laitteistoa voidaan pitää koeteltuina ja toimivaksi havaittuina. Ruotsissa rakennetusta laitteisto on myös tietoa kohtuullisesti, joten tätä voidaan pitää suunnittelun lähtötasona.

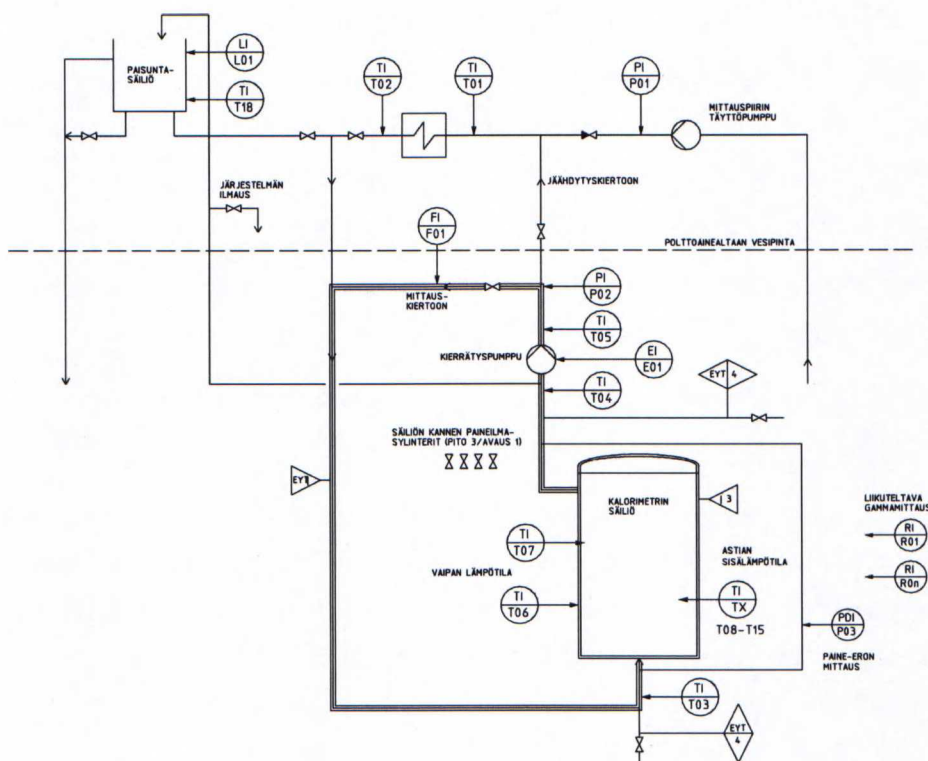
## **2.5 Mittausprosessi**

Mittauksesta on tehty periaatesuunnitelma, missä määritellään mittauslaitteiston toimintaperiaate ja mittauksen kulku (Snellman 2009). Mittaukset tehdään kalorimetrisesti ja huomioimalla karkaavan gammasäteilyn teho. Mittauspaikkana toimii Loviisan voimalaitoksen käytetyn polttoaineen varasto. Laitteiston mekaaniset päälaitteet ovat kalorimetrin säiliö mittauspiireineen, paisuntasäiliö, täyttöpiiri, mittaus- ja toimilaitteet sekä valvonta-asema.

Mittauksilla tutkitaan lämpötilaa, painetta, tehoa, virtausta ja gammavuota. Mittauksien tarkoitus on kerätä tietoa laitteen sisältä kokeita ja turvallisen toiminnan toteutusta varten. Lämpötilamittauksia sijoitetaan mittauspiiriin, altaaseen, täyttöpiiriin ja paisuntasäiliöön. Painemittauksia on mittaus- ja täyttöpiirissä. Painemittauksella on turvallisuusmerkitys silloin, jos yhteys paisuntasäiliöön menetetään. Pumpun teho mitataan käyttöjännitteestä ja virrasta. Pumpun tuottama tilavuusvirta mitataan mittauspiiriin sijoitetusta virtausmittarista. Gammamittaukset sijoitetaan kalorimetrin ulkopuolelle usealle eri etäisyydelle. Mittauksen on oltava liikuteltava, sillä polttoaineen epäsymmetrisyydestä johtuen sen säteilykenttä ei ole tasainen.



Mittaukset on eritelty kuvassa 10, joka on muokattu Snellmanin alkuperäisestä kaaviosta sopimaan paremmin A4-paperikokoon. Kaaviossa mittaukset on esitetty ympyrän muotoisilla osoittimilla. Mittaustyyppien lyhenteet ovat:  $T$  on lämpötilamittaus,  $P$  on painemittaus,  $E$  on tehonmittaus,  $F$  on virtausmittaus,  $R$  on gammavuon mittaus ja  $L$  on pinnanmittaus.



**Kuva 10. Kalorimetrin PI-kaavio (Snellman 2009).**

Toimintakaaviossa lämpöeristetty mittaussiiri on piirretty kolmella yhtenäisellä viivalla. Mittauslaitteiden lisäksi mittaussiiriin kuuluu kalorimetrin säiliö, kierrätysputkisto ja -pumppu. Piiristä on myös yhteyksiä muihin järjestelmiin ja altaaseen. Näitä ei kuitenkaan lasketa kuuluvaksi mittaussiiriin. Paisuntasäiliöstä on avoin yhteys mittaussiiriin koko mittauksen ajan. Tällä välitetään paineen nousu veden lämmitessä. Mittaussiirin paine saadaan ympäristön painetta suuremmaksi sijoittamalla paisuntasäiliö altaan reunalle. Tällöin säiliön vedenpinnan korkeuden muutoksesta voidaan havaita järjestelmän vuodot.

Jäähdytteen kiertosuunta mittaussiirissä on luonnollinen eli veden tiheyseroihin perustuva. Kalorimetrin läpi kulkiessaan vesi lämpenee ja laajenee, jolloin sen luonnollinen kiertosuunta on alhaalta ylös. Kierrätyspumppun tarkoituksena on veden sekoittaminen ja tätä kautta jäähdytteen tasalämpöisyyden varmistaminen. Tasaisella lämmönjakautumisella saadaan luotettavia mittaus-tuloksia.

Polttoaineen siirrot tehdään tätä varten suunnitellulla polttoaineen siirtolaitteistolla. Kalorimetrin kannen avaus tehdään toimilaitteen avulla, jonka toiminta on varmennettu käsikäyttöisellä avausmekanismilla. Kannen on oltava lepotilanteessa avoin ja toimittava siten, että energian menetystilanteessa se palaa tähän tilaan. Tällä varmistetaan polttoaineen jäähdytys häiriötilanteissa.

Kalorimetrin säiliön rakenne koostuu avattavan kannen lisäksi kahdesta sisäkkäisestä metallilieriöstä. Lieriöiden välissä on ilmatila, joka toimii lämpöeristeenä. Tutkittava polttoaine asetetaan sisempään lieriöön, joka toimii siis polttoainetelineenä mittauksen ajan. Kalorimetri seisoo omien tukiansa varassa ja sen paino kohdistetaan altaan pohjaan.

Laitteiston turvaluokitus tehdään ydinvoimalaitosohjeen 2.1 mukaan. Kalorimetrin säiliö on luokiteltu turvaluokkaan 3, ohjeen liitteessä olevan kohdan k. mukaan:

*"Ydinpolttoaineen käsittely- ja tarkastusjärjestelmät, joiden virhetoiminta voi vaarantaa polttoaineen eheyden."*

Kalorimetrin polttoaineen jäähdytyksen varmistavat toimilaitteet luokitellaan turvallisuusluokkaan 4, koska vaurioituminen vaikeuttaa turvallista käyttöä häiriötilanteessa. Mittauspiirin toimintaan ja täyttööön liittyvät laitteet ja mittaukset on luokiteltu luokkaan EYT, koska tällä piirillä ei ole turvallisuusmerkitystä. Ohjausjärjestelmä kuuluu luokkaan EYT, koska laitteisto toimii vain mittaustiedon kerääjänä. Laitteiden ohjaus tehdään valvonta-asemalta käsin auki/kiinni-ohjauksella. (Snellman 2009, 2)

### **2.5.1 Mittauksen kulku**

Polttoaineen ollessa kalorimetrissä mittauspiiri ja paisunta-allas täytetään vedellä täyttöpumpun avulla. Mittauspiirin tiiveys todetaan seuraamalla paisuntasäiliön vedenpintaa, sillä vuodot piiristä aiheuttavat veden vähenemisen säiliöstä. Seuraavaksi mittauspiirissä oleva vesi jäähdytetään kierrättämällä vesi altaan reunalla olevan lämmönvaihtimen kautta. Tätä jatketaan kunnes piirin vesi on noin 3 °C viileämpää kuin ympäröivän altaan vesi. Lopuksi mittauspiiri eristetään lämmönvaihtimesta ja lämmön annetaan tasaantua hetki.

Mittauksen aikana ylläpidetään veden tasaista virtausta ja mitataan lämpötilan muutosta. Pumpu lisää mittausjärjestelmän lämpötehoa häviöiden kautta. Tämä lisäteho on huomioitava lopullisissa mittauksissa. Mittauskierto lopetetaan, kun järjestelmän sisälämpötila ylittää noin 3 °C ympäröivän altaan veden lämpötilan. Mittauksen päätyttyä kalorimetrin kansi avataan ja jäähdytys toteutetaan luonnonkierrolla. Hyväksyttäväksi mittausajaksi on määritelty yksi työpäivä (8 h), mikä sisältää polttoaineen siirrot kalorimetriin ja sieltä takaisin varastotilaan. Mittausten välillä laitteiston lämpötilan on annettava tasaantua ennen seuraavaa mittausta.



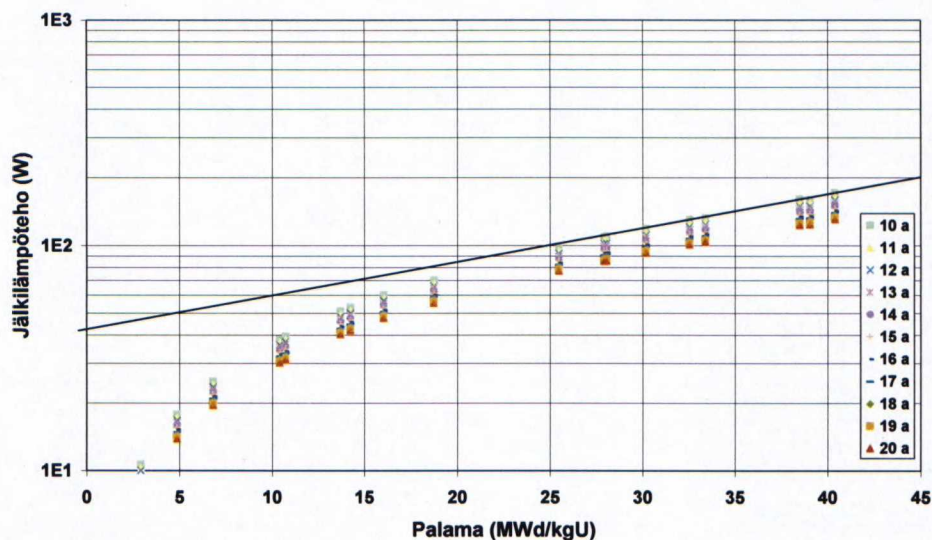
Kalorimetri kalibroidaan tunnetun lämpötehon avulla. Tätä varten on rakennettava kalibrointielementti, jonka tuottama lämpöteho tunnetaan. Mittauspiiri koestetaan usealla eri lämpöteholalla, jolloin saadaan luotua tehoja vastaava kalibrointikäyrästä. Käytetyn polttoaineen mittauksissa saatuja muutoskäyriä verrataan kalibrointikäyriin, jolloin polttoaineen jälkilämpöteho saadaan määritetyksi.

Laitteiston valvonta ja operointi hoidetaan PC-pohjaiselta valvonta-asemalta. Asema toimii myös mittaustiedon kerääjänä. Järjestelmän venttiilien ja pumppujen operointi tehdään valvonta-aseman kautta käsiohjauksella. Laitteistossa tulee olla myös valvonta-asemasta riippumaton lämpötilanmittaus turvallisuustoimintoja varten. Riippumattoman mittauksen tarkoituksena on aiheuttaa kalorimetrin kannen pakkoavaus, jos sen sisäinen lämpötila nousee ennalta määrättyä arvoa suuremmaksi.

Laitteiston suunnittelussa tulee varautua häiriötilanteisiin. Häiriötilanteen selvittämiseksi laite tulee olla avattavissa siten, että vedellä on vapaa virtaus polttoaineen jäähdyttämiseksi. Ensimmäisesti laitteiston sisältämän veden lämpenemisen tulee kestää niin kauan, ettei kiehumisvaaraa synny pitkään aikaan. Riittävänä häiriötilanteen korjausaikana voidaan pitää kahdeksan tuntia.

### 2.5.2 Arvio mitattavista tehoista

Loviisan voimalaitoksen polttoaineen ominaisuuksia on tarkasteltu ORIGIN-laskentaohjelmalla (Routamo & Toppila 2007). Menetelmällä voidaan määrittää mm. käytetyn ydinpolttoaineen sisältämät fissiotuotteet ja jälkilämpöteho. Kuvassa 11 olevan tarkastelun perusteella yli 10 vuotta jäähtyneiden ja yli 25 MWd/kgU palamilla jälkilämpöteho näyttäisi seuraavan lineaarisesti palamaa.



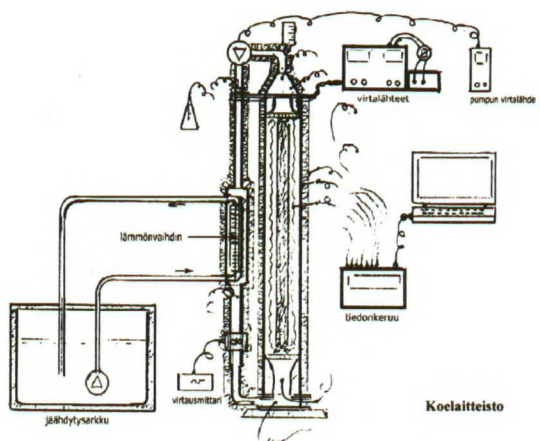
Kuva 11. Polttoainenipun jälkilämpöteho palaman funktiona (Routamo & Toppila 2007).

Loviisan voimalaitoksen polttoaineen palama on lähes poikkeuksetta yli 30 MWd/kgU. Tarkastelussa suurin palama oli 40,39 MWd/kgU. Tällaisten nippujen jälkilämpöteho vaihtelee 10...20 vuoden jäähtymisajoilla välillä 90...170 W ja 20...40 vuoden jäähtymisajoilla 65...130 W. Käytännössä jälkilämpötehon voidaan hyvällä varmuudella olettaa olevan välillä 50...200 W, tyyppillisten arvojen ollessa välillä 100...150 W.

### 2.5.3 Mallikoe

Polttoaineen mittaamiseen käytettävästä kalorimetristä on rakennettu 1:2 pienoismalli, minkä tarkoitus oli kerätä tietoa mitta-antureista, laitteen toiminnasta ja mittaustiedon käsittelystä. Todellisesta mittaustilanteesta poiketen mittaukset tehtiin huoneen lämmössä, missä laitteistoa ympäröi 23 °C ilma. Testilaitteistolla saavutetut koetulokset ovat nähtävissä kokonaisuudessa Tommi Rämän raportissa (Rämä 2009a).

Laitteiston lämpöteho ja tilavuus on sovitettu mallin mukaisesti alkuperäistä pienemmäksi. Mittattavien polttoainenenippujen lämpötila vaihtelee välillä 50 - 200 W, joten kokeissa käytetty lämmitysteho oli 25...100 W. Järjestelmän sisältämän veden massa oli noin 13 kg. Laitteistossa oleva vesi jäähdytettiin noin 3 °C alle ympäristön lämpötilan, jonka jälkeen veden lämpenemistä mitattiin. Jäähdytteen tasalämpöisyyden varmistamiseen käytettiin pumppua, jonka tilavuusvirta oli noin 10 l/min. Lämpötilamittaus järjestettiin 14 kappaleella PT-100 vastuslämpötila-antureita, joiden tarkkuus lämpötilassa 20 °C on noin  $\pm 0.2$  °C. Eristys on hoidettu 20 mm so-lumuovilla. Testilaitteiston periaate on esitetty kuvassa 12. (Rämä 2009a)

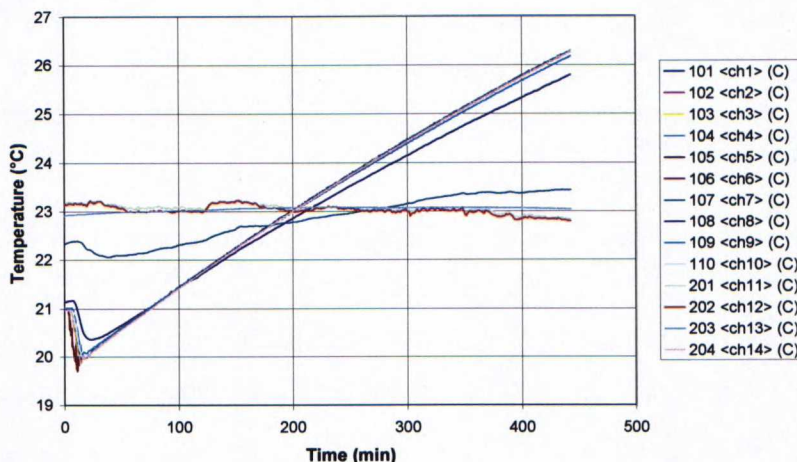


**Kuva 12. Koelaitteisto (Rämä 2009a, 4).**

Lämpötila-anturit kalibroitiin mittaamalla kaksi tunnettua lämpötilaa ja määrittämällä näiden perusteella kulmakerroin. Mittauslämpötilat olivat 0 ja 20 °C, jolloin kalibrointi tehtiin todellisen käyttölämpötilan läheisyydessä. Jäähdytteen virtausmittari oli kalibroitu ennakoon. (Rämä 2009a)



Kokeiden aikana lämmönsiirtimen kylmä puoli pidettiin tyhjänä, ettei tuloksia häiritsevää lämpönielua pääsisi muodostumaan. Lämmöntuottoon käytettiin vastuskaapelia, jonka maksimiteho oli 150 W. Kokeissa etsittiin tasapainolämpötila, missä laitteiston lämmöntuotto ja -hävikki ovat tasapainossa. Lisäksi tutkittiin lämpötehon vaikutusta lämpötilan muutosnopeuteen. Kuvassa 13 on esimerkkitulokset kokeesta, jossa on käytetty 50 W lämmitystehoa. (Rämä 2009a)



**Kuva 13. Kokeen lämpötilakuvaaja (Rämä 2009b, 11).**

Kuvasta erottuu toisistaan kaksi eri käyräriippua. Ne kuvaavat laitteiston sisälämpötilan muutosta ja ympäristön lämpötilaa. Sisälämpötilan muutoksen alussa nähdään jäähtymisen aiheuttama lämpötilan nopea lasku.

Rämän mukaan mittauslaitteiston tarkkuus voitiin todeta riittäväksi, vaikka kokeiden toistettavuus jäi huonoksi. Raportissa tälle ei löydetty mitään yksittäistä syytä. Lisäksi osassa mittauksia jäähtymisen ilmakuplien purkautumien aiheutti ilmausputkessa olevan kylmän jäähtymisen pääsemisen järjestelmään. Tämä näkyi lämpöpiikkeinä mittauksessa. Lämpötila palautui piikin jälkeen normaaliksi, joten sen ei katsottu haittaavan mittausta pitkällä aikavälillä. Lopullisessa laitteistossa tätä ominaisuutta voidaan vähentää minimoimalla kylmien jäähtytetaskujen määrä järjestelmässä.

## 2.5.4 Koetulosten arviointi matemaattisen mallin perusteella

Tomi Routamo on arvioinut koelaitteiston toimintaa yksinkertaisen matemaattisen mallin avulla (Routamo 2009). Mallissa kuvataan systeemin lämpötilan muutosnopeuden riippuvuutta lämpötehosta ja häviöistä. Lämpötilan muutosta kuvaava yhtälö on

$$mc \frac{dT}{dt} = P - kA(T - T_a), \quad (5)$$

jossa  $m$  on tarkasteltavan systeemin massa,  $c$  on systeemin ominaislämpökapasiteetti,  $T$  on systeemin lämpötila,  $P$  on systeemiin syötettävä teho,  $k$  on systeemin lämmönsiirtokerroin,  $A$  on systeemin ulkopinta-ala,  $T_a$  on ympäristön lämpötila ja  $t$  on aika.

Koska systeemin lämmönsiirtokerroimen  $k$  ja ulkopinta-alan  $A$  määrittäminen voi olla suhteellisen monimutkainen tehtävä, on järkevää käsitellä tätä yhtenä lämpöhäviökertoimenä. Kertoimen suuruus voidaan arvioida systeemin tasapainotilasta, koska tällöin systeemistä poistuva teho on yhtä suuri kuin siihen syötetty teho ja lämpötila pysyvät vakoina. Tällöin edellä esitetystä yhtälöstä lämpötilan muutosnopeutta kuvaava termi  $dT/dt$  supistuu pois. Lämpöhäviökertoimen yhtälöksi saadaan

$$kA = \frac{P}{T - T_a} \quad (6)$$

Toisaalta tarkasteltaessa systeemiä lähellä ympäristön lämpötilaa, lämpöhäviön voidaan olettaa olevan pieni. Tällöin lämpötilan muutosta kuvaavasta yhtälöstä tippuu jälkimmäinen termi pois. Lämpötilan nousunopeudeksi tehon perusteella saadaan

$$P = mc \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Lämpöhäviökertoimen  $kA$  suuruudeksi kokeiden perusteella arvioitiin noin 3 W/K (Routamo 2009, 3). Raportin mukaan sisälämpötilan nousunopeuden perusteella arvioidussa massan määrässä ilmeni epälineaarisuutta. Mittaustulosten perusteella laitteiston massan määrä riippuu syötetystä tehosta, mikä ei kuitenkaan ole fysikaalisesti järkevää. Selitykseksi mietittiin ylimääräistä lämpöhäviötä laitteistosta haihtumisen kautta, mutta tätä ei voitu täysin osoittaa todeksi. Toinen vaihtoehto oli virheet mittaustuloksissa. Poistamalla selkeästi poikkeavat mittaustulokset, massan määrä pysyi lähes vakiona. Kokeissa kerättyjen tietojen perusteella ei voida varmuudella sanoa, kumpi vaihtoehdoista on todennäköisempi. (Routamo 2009)

Routamon raportissa todettiin, että malli kuvaa lämpötilan muutosta riittävällä tarkkuudella (2009, 6). Teorian ja käytännön vastaaminen toisiaan lisää varmuutta mittausten järkevyydestä ja että laskentamallin validointi voidaan toteuttaa kokeellisesti.

## 2.6 Ydinenergian viranomaisvaatimukset

Suomalaisen ydinenergian säädöshierarkian korkeimmalla tasolla on ydinenergilaki ja sitä täydentävä ydinenergia-asetus. Lain tarkoituksena on mm. pitää ydinenergian käyttö yhteiskunnan kokonaisedun mukaisena ja varmistua, että sen käyttö on turvallista. Laissa säädetään ydinenergian käytön yleisistä periaatteista, ydinhuollon toteuttamisesta, käytön luvanvaraisuudesta ja valvonnasta sekä toimivaltaisista viranomaisista. (L 11.12.1987/990)



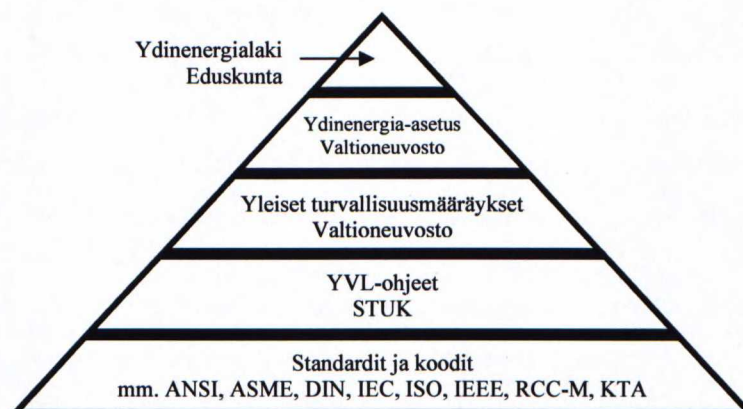
Hierarkiassa seuraavana ovat valtioneuvoston yleiset turvallisuusmääräykset. Yleisiä turvallisuusmääräyksiä on asetettu yhteensä neljä kappaletta: 733-, 734-, 735- ja 736/2008. Määräykset koskevat ydinvoimalaitoksen turvallisuutta, turvajärjestelyjä, valmiusjärjestelyjä ja ydinjätteen loppusijoituksen turvallisuutta. Esimerkiksi valtioneuvoston asetuksessa ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta sanotaan polttoaineen käsittelystä seuraavaa:

**15 § Polttoaineen käsittely ja varastointi**

*Polttoaineen käsittelyssä ja varastoinnissa on turvattava sen riittävä jäähdytys ja säteilysuojaus. Suojakuoren vaurioituminen käsittelyn ja varastoinnin aikana on estetävä suurella varmuudella. Kriittisyysonnnettomuuden mahdollisuuden on oltava erittäin pieni. Polttoaineen varastointiolosuhteet on pidettävä sellaisina, ettei polttoainepun tiiviys tai mekaaninen kestävyys olennaisesti heikkene suunniteltuna varastointiaikana. (A 733/2008)*

Neljännän tason muodostavat ohjeistukset. Säteilyturvakeskus (STUK) antaa ydinvoimalaitosohjeita (YVL-ohje), jotka sisältävät turvallisuuden vähimmäistason ja valvontamenettelyjä koskevia vaatimuksia. Ohjeita sovelletaan käytössä ja rakenteilla oleviin ydinlaitoksiin.

Viimeisenä tasona tulevat standardit. Standardit eivät yleensä ole velvoittavia, mutta viranomaisohjeissa usein viitataan niihin, kun halutaan antaa esimerkkejä hyväksyttävistä menetelmistä. Niitä asettavat standardisointilaitokset. Standardit voivat olla joko kansallisia tai kansainvälisiä. Säädöshierarkia on kuvassa 14.



**Kuva 14. Ydinenergian vaatimusten hierarkia sekä vaatimusten asettajat.**

Käytettävien YVL-ohjeiden ja standardien määrä on määritettävä tapauskohtaisesti. Viranomaisohjeiden lisäksi ydinvoimayhtiöillä on omat sisäiset ohjeet, jotka täydentävät ja tarkentavat YVL-ohjeita. Ohjeet määrittävät suunnittelussa huomioitavien vaatimusten vähimmäistason, mutta eivät menetelmiä niiden huomioimiseen.

### 2.6.1 Ydinvoimalaitoksen turvallisuusluokat ja niiden merkitys

Ydinvoimalaitosohjeen 1.0 mukaan ydinvoimalaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet on luokiteltava niiden turvallisuusmerkityksen perusteella. Nämä on suunniteltava, valmistettava ja asennettava sekä niitä on käytettävä siten, että niiden laatutaso on riittävä kohteen turvallisuusmerkitys huomioon ottaen. Turvallisuusluokat on jaettu neljän eri vaatimustason lisäksi luokkaan EYT (ei ydinteknisesti luokiteltu) YVL-ohjeen 2.1 mukaisesti.

Tiukimman tason muodostavat luokan 1 järjestelmät, rakenteet ja laitteet joiden vika tai vaurio uhkaa välittömästi laitoksen turvallisuutta. Turvallisuusluokkaan 4 kuuluvat kohteet voivat vaurioituessaan aiheuttaa laitosta uhkaavan alkutapahtuman, vaarantaa ympäristön tai turvallisuustoiminnon toteuttamisen.

Luokituksen perusteella määräytyvät suunnittelulle, valmistukselle, asennukselle, testaukselle ja tarkastukselle asetettavat vaatimukset. Esimerkiksi mekaanisten laitteiden valmistus, testaus ja tarkastus tulee tehdä hyväksyttyjä suunnitelmia noudattaen. Turvallisuusluokka vaikuttaa suoraan laitteiden ja rakenteiden laatuvaatimuksiin ja laadunvarmistamiseen.

Turvallisuusluokitellun kohteen suunnittelussa on tärkeää ymmärtää turvallisuusmerkitys ja vaikutukset muihin järjestelmiin. Järjestelmän, rakenteen tai laitteen suunnitteluperusteissa on huomioitava laitoksen sisäiset (kuten tulva ja tulipalo) ja ulkoiset (kuten poikkeukselliset sääolosuhteet ja maanjäristykset) tapahtumat riittävällä laajuudella. Järjestelmä on suunniteltava noudattaen turvallisuusluokkaan liittyviä laatuvaatimuksia. Suunnittelun tuloksena syntyy rakennesuunnitelma, jossa esitetään laadunvalvontasuunnitelma, suunnitteluasiakirjat, valmistussuunnitelmat sekä testaus- ja tarkastussuunnitelmat.

Mekaanisten laitteiden ja rakenteiden laatuun oleellisesti vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävät rakenneaineet, valmistusmenetelmät ja valmistuksessa käytettävät laitteet, henkilöstön pätevyys sekä valmistusorganisaation laatujärjestelmät. Valmistettavan tuotteen laatua ei voida kaikilta osin todeta valmistuksen jälkeisillä tarkastuksilla, joten valmistuksen aikainen valvonta on tärkeää. Valvonnan tarkoituksena on varmentaa, että tuote on suunnitelman mukainen. STUK suorittaa pääsääntöisesti turvallisuusluokkien 1 ja 2 valmistuksen valvontaa.

Valmistuksen jälkeisellä rakennetarkastuksella varmistetaan, että laitteen tai rakenteen valmistuksessa ja laadunvarmistuksessa on noudatettu hyväksyttyä rakennesuunnitelmaa ja hyväksytyjä menettelytapoja. Ydinlaitoksen rakennetarkastukset jaetaan viiteen eri tarkastusalueeseen turvallisuusmerkityksen perusteella. Tarkastusalueet eroavat toisistaan tarkastuksen tekijän ja laajuuden osalta. Tärkeimpien kohteiden tarkastuksen suorittaa STUK, kun alimmalla tasolla ei ole rakennetarkastusta. Ydinvoimalaitosohjeessa 1.15 on esitetty ne periaatteet, joiden mukaan rakennetarkastus tehdään.

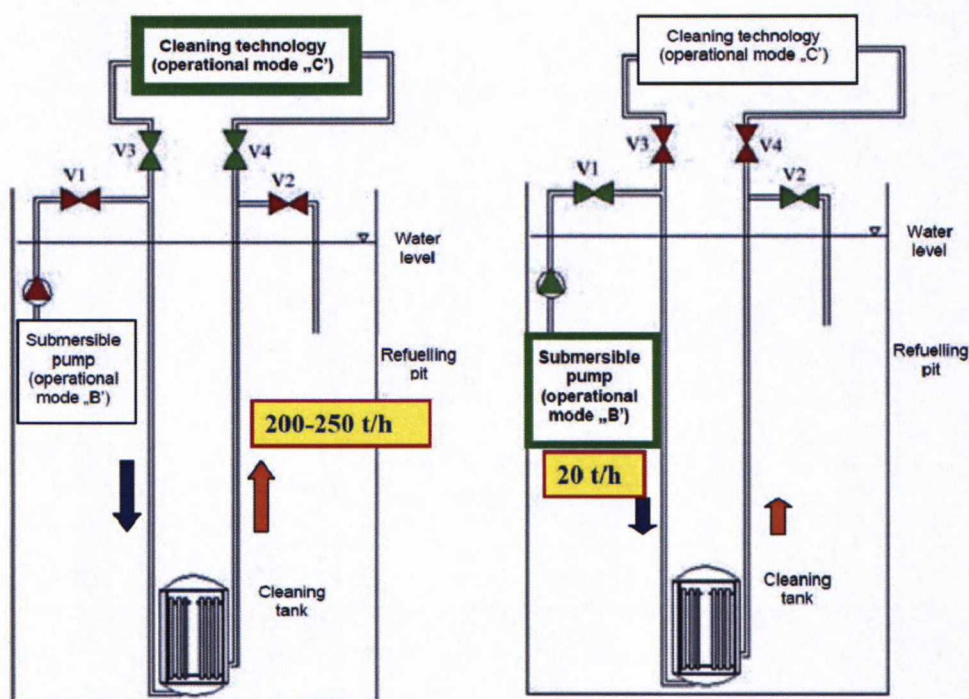


## 2.7 Ydintekniset käyttötapahtumat

Ydinenergia-alalla tehdään kansainvälistä yhteistyötä monilla eri sektoreilla. Niillä pyritään kehittämään ja parantamaan ydinvoiman turvallisuutta ja tekniikkaa. Yksi tiedonvaihtokanava on ydinlaitosten tapahtumista raportointi. Raportteja tapahtumista, joilla on ollut merkittävää vaikutusta laitoksen turvallisuuteen välittävät IAEA ja NEA.

Eräs ydinpolttoaineen käsittelyyn liittyvä käyttötapahtuma sattui Unkarissa, Paksin ydinvoimalaitoksella 10.4.2003. Voimalaitoksen primääripiirissä tehdyn puhdistustoimenpiteen seurauksena osa reaktorissa olleista polttoainenipuista tukkeutui osittain. Likaantuneet ja osittain tukkeutuneet polttoaineniput päätettiin pestä aiempien hyvien kokemusten perusteella. Tehtävää varten valmistettiin pesulaitteisto, johon mahtui 30 polttoainenippua. (HAEA 2003)

Laitteistolla oli puhdistettu useita nippueriä ilman ongelmia, kunnes erään pesun päätteeksi polttoaineen käsittelyssä tarvittava nosturi oli varattu. Pesulaitteiston puhdistuskierto vaihdettiin pienempitehoiselle jäähdytyspumppulle, kuvan 15 mukaisesti.

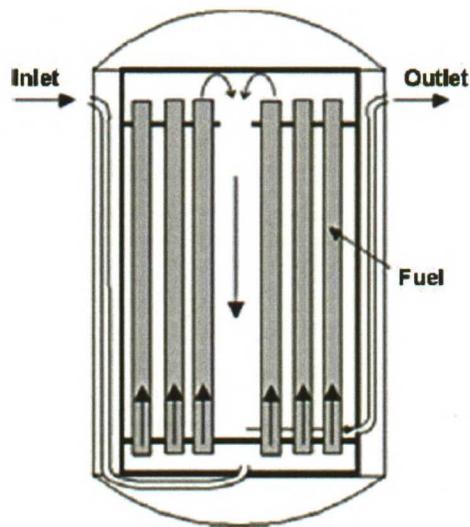


**Kuva 15. Polttoaineen puhdistus- ja väliaikainen jäähdytyskierto (NEA 2008, 9).**

Muutaman tunnin kuluttua reaktorihallin säteilymittari hälytti kohonneiden säteilyannosten vuoksi. Kohonneen säteilyn ajateltiin johtuvan pesulaitteesta olevasta rikkiäisestä polttoainenipusta. Laitteen kansi yritettiin avata, mutta yksi avausmekanismin kolmesta vaijerista rikkoontui yrityksen johdosta. Kesti lopulta useita tunteja, ennen kuin kansi saatiin raotetuksi.

Kannen avaamisen yhteydessä altaan vedenpinnan korkeus laski äkillisesti useita senttimetrejä ja pinnalle nousi kuplia. Tämän ajateltiin johtuvan laitteen kiehumisesta tyhjäksi ja veden syökyä äkillisesti kuuman polttoaineen pinnalle. Kului vielä useita päiviä, ennen kuin kansi saatiin kokonaan auki ja polttoaineen tilanne voitiin tarkastaa videokameralla. Tarkastuksen yhteydessä polttoaine todettiin pahoin vaurioituneeksi ja osittain levinneeksi pesulaitteiston sisälle.

NEA:n onnettomuusraportin mukaan tärkeimmät onnettomuutta edesauttaneet tekijät olivat pesulaitteen jäähdytekierron puutteellisuus ja laitteen sisäisten mittauslaitteiden puuttuminen (NEA 2008, 16). Jäähdytekierto oli toteutettu siten, että osa kierrosta pystyi ohittamaan kuuman polttoaineen. Lisäksi jäähdytteen kierrätyslinjat oli sijoitettu laitteen pohjalle, kuten kuva 16 osoittaa. Tämä mahdollisti höyrytaskun muodostumisen säiliön yläosaan, missä myös polttoaine sijaitsee. Puutteellinen anturointi ei mahdollistanut muodostuvan vaaratilanteen huomaamista. NEA:n raportin mukaan kannen riittävän aikaisella avaamisella jäähdytteen riittävyys olisi voitu varmistaa.



**Kuva 16. Pesulaitteiston jäähdytekierto (NEA 2008, 9).**

Onnettomuus osoittaa, kuinka tärkeää on tuntee järjestelmän käyttäytyminen erilaisissa tilanteissa ja varautua niihin etukäteen. Tapahtuma oli monen tekijän summa, missä jokainen yksittäinen osa olisi voinut estää onnettomuuden tapahtumisen. Laitteiston suurin puute oli mittalaitteiden puuttuminen, jolloin tilanteen kehittymistä ei voitu seurata ja tilanne pystyi kehittymään pitkälle. Lisäksi laitteiston kansi olisi pitänyt avata heti puhdistuskierron päätteeksi.

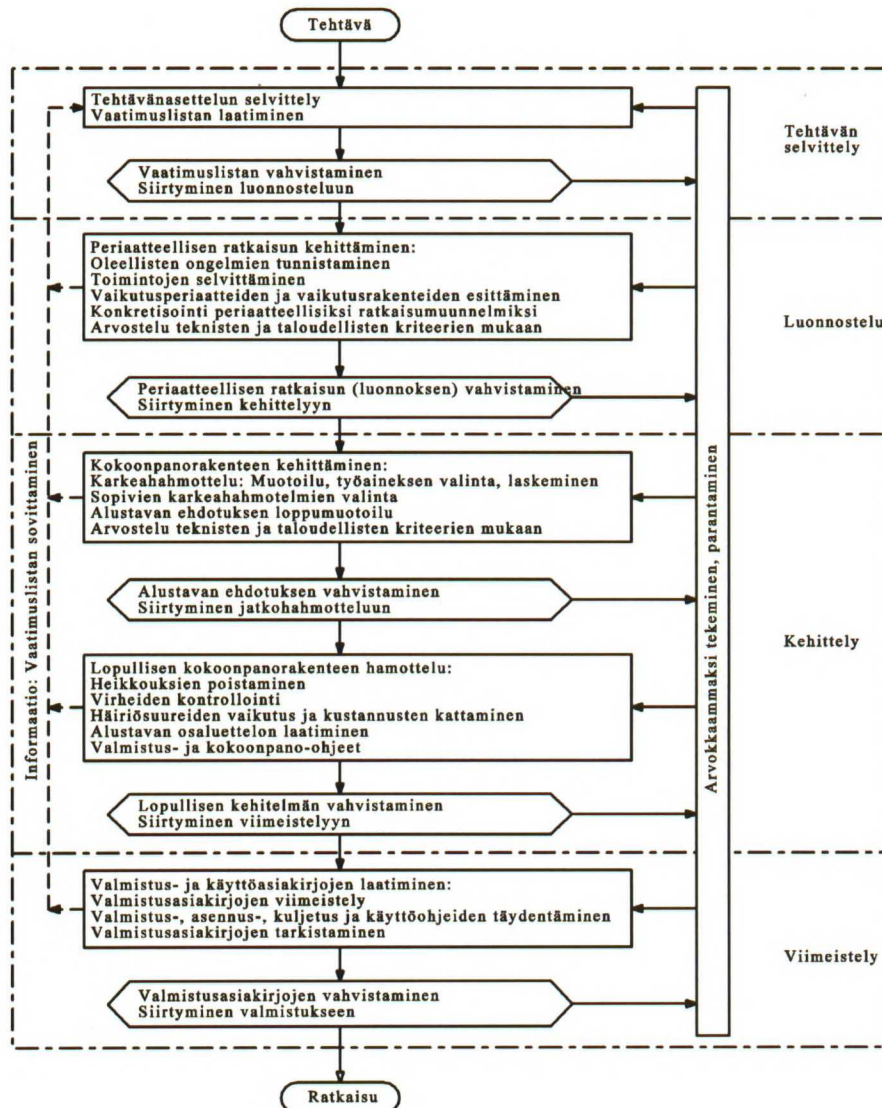


### 3 Suunnittelumenetelmät

#### 3.1 Systemaattinen tuotekehitys

Koneensuunnittelun avuksi on kehitetty erilaisia menetelmiä. Tässä työssä käytetään Pahl:n ja Beitz:n kehittämää konstruktometodiikkaa. Metodiikka kattaa suunnittelun vaiheet tehtävän selvittelystä lopputuotteen viimeistelyyn. Menetelmä on yleispätevä ja sitä voi hyödyntää mm. koneenrakennuksen, hienomekaniikan, elektroniikan kytkentöjen, ohjelmistojen kehittelyn ja prosessiteknisten laitteiden suunnittelussa. Systemaattinen toimintatapa antaa työkalun tutkia, jäsentää ja ratkaista vallitseva tuotekehitysongelma. Menetelmä on esitetty kokonaisuudessa kirjassa Koneensuunnitteluoppi. (Pahl & Beitz 1986)

Konstruointi voidaan karkeasti jakaa neljään vaiheeseen: Tehtävän selvittelyyn, luonnosteluun, kehittelyyn ja viimeistelyyn. Suunnitteluprosessi etenee pääpiirteissään edellä mainitussa järjestyksessä, mutta tarvittaessa on mahdollisuus palata aiempaan vaiheeseen esiin nousseiden ongelmien korjaamiseksi. Menetelmän keskeinen ajatus on muodostaa vaatimuslista, mikä määrittää tuotteelta odotetut vaatimukset. Jokaisen vaiheen jälkeen syntynyttä tulosta verrataan vaatimuslistaan ja tarvittaessa kehitetään ratkaisua paremmaksi. Tällä varmistetaan vaatimusten toteutuminen lopullisessa tuotteessa. Konstruoinnin vaiheet on esitetty kuvassa 17. Tässä tutkimuksessa keskitytään kolmeen ensimmäiseen vaiheeseen. Viimeistelyvaihe on rajattu työn ulkopuolelle.



Kuva 17. Konstruoinen työskäleet (Pahl & Beitz 1986, 51).

### 3.1.1 Tehtävän selvittely

Tehtävän selvittelyn aikana hankitaan tietoa tuotteelle asetettavista reunaehdoista. Reunaehdot olisi löydettävä riittävän laajasti jo alkuvaiheessa, jotta työskentelyn aikana täydennykset ja korjaukset rajoittuisivat vain välttämättömimpään. Reunaehdot sisältävä asiakirja toimii myös tietopankkina, minkä avulla voidaan siirtää tietoa projektin osanottajien välillä.

Selvitysvaiheen lopputuloksena laaditaan vaatimuslista. Vaatimuslistaa pidetään ajan tasalla koko konstruktioprosessin ajan. Vaatimusten asettelussa tulee olla kriittinen, jotta vältetään liian rajaavilta vaatimuksilta. Vaatimukset olisi hyvä muotoilla helposti mitattavaan tai tutkittavaan muotoon, jotta vältetään osapuolten välisiltä mielipidekiistoilta. Lopullisen tuotteen tulee täyttää



kaikki sille asetetut vaatimukset. Vaatimuslistaan kirjataan myös toivomukset, jotka parantavat tuotteen arvoa asiakkaalle. Toivomukset tulisi luokitella tärkeysjärjestykseen, sillä harvoin kaikki toiveita voidaan toteuttaa.

Tässä työssä tehtävän selvitys koostui aikaisempaan tutkimusaineistoon tutustumisesta. Aihetta on tutkittu laajasti niin kansainvälisellä tasolla kuin yrityksen sisällä. Lisäksi työssä tehtiin katsaus ydinvoimateknisiin käyttötapauksiin. Viranomaisvaatimukset asettavat myös omat reunaehdot.

### 3.1.2 Luonnostelu

Luonnostelun tarkoituksena on päästä eroon haitallisista ennakkokäsityksistä, etsiä tutkittavan ilmiön toimintorakenne ja vaikutusperiaatteita. Luonnostelun lopputuloksena syntyy periaatteellinen ratkaisu eli luonnos vaikutusperiaatteita yhdistelemällä.

#### Abstrahointi

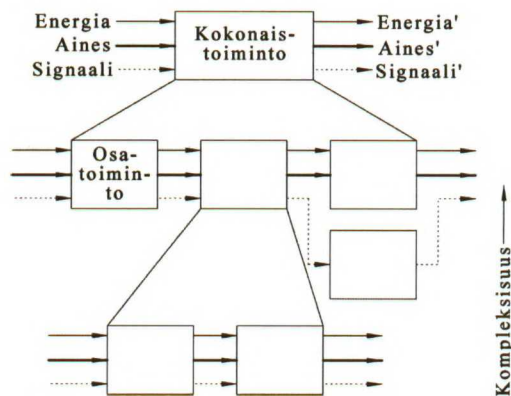
Suunnittelijalla tulee usein jokin ratkaisuvaihtoehto mieleen tehtävän selvittelyn aikana. Tämä vaihtoehto riippuu paljon vanhoista kokemuksista ja tiedoista, eikä välttämättä edusta uudenlaisinta ja tarkoituksenmukaisinta ratkaisua. Abstrahoinnilla pyritään etsimään ja korostamaan tehtävän ydinolemusta. Tähän päästään hakemalla vaatimuslistasta tehtävän reunaehdot ja muotoilemalla ongelma niiden avulla ratkaisuun nähdessä neutraalisti. Koneensuunnitteluopissa on esitetty esimerkki ongelman muotoilusta:

*"älä suunnittele autotallin ovea, vaan sellaista tapaa sulkea autotalli, joka suojaa auton varkailta ja säältä". (Pahl & Beitz 1986, 80)*

Tässä työssä ei ollut syytä käyttää abstrahointiin paljoakaan aikaa. Aikaisemmat kalorimetriset jälkilämpötehon mittaamiset ovat osoittaneet konseptin toimivuuden. Abstrahoinnin käytössä on keskitytty osaongelmien muotoiluun, missä vertailtavat järjestelmät asettavat helposti ennakkokäsityksiä ongelmien ratkaisuun.

#### Toimintorakenne

Toimintorakenne esittää kokonaistoiminnon tulo- ja lähtösuureiden välisen yhteyden lohkokaavioiden avulla. Tehtävän laajuudesta riippuen kokonaistoiminnosta voi tulla monimutkainen. Tällöin tapahtuman lähtö- ja tulosuureiden välinen riippuvuus jää epäselväksi. Tehtävän hahmottamisen helpottamiseksi kokonaistoiminto voidaan hajottaa useampiin, yksinkertaisempiin ja havainnollisempiin osatoimintoihin. Kokonaistoiminnon ja osatoimintojen muodostamaa kaaviota kutsutaan toimintorakenteeksi. Esimerkki toimintorakenteesta on kuvassa 18.



**Kuva 18. Toimintorakenne (Pahl & Beitz 1986, 82).**

Pahlin ja Beitzin mukaan Weitzäcker asetti energian, aineen ja informaation käsitteet perustavaa laatua oleviksi käsitteiksi (Pahl & Beitz 1986, 22). Mikäli näiden tulo- ja lähtösuureiden välillä tapahtuu muutoksia, on se suhteutettava aikaan. Vasta tällöin tapahtuma on ymmärrettävä. Tämän riippuvuuden seurauksena toimintorakenne seuraa ajallisesti tapahtumapolkua.

Edellä olevassa kuvassa tulosuureet ovat kaavion vasemmalla ja lähtösuureet oikealla puolella. Energiaa kuvaa ohut ja yhtenäinen, ainetta leveä ja yhtenäinen ja signaalia ohuella katkoviivalla piirretty nuoli. Lähtösuure on erotettu tulosuureesta heittomerkillä. Kappaleessa 4.2 on esitetty mittauksen toimintorakenne ja laitteen elinkaari.

### Toiminnalliset yhteydet

Toiminnallinen yhteys voidaan rakentaa loogisen tai fysikaalisen tarkastelun perusteella. Loogisessa tarkastelussa etsitään sellaisia syy-yhteyksiä, joiden tulee toteutua johdonmukaisuuden tai pakonomaisuuden takia. Esimerkiksi murtolujuuden testauksessa on ensin tapahduttava osatoiminto "kuormittaa kappale", ennen kuin osatoiminnot "mitata voima" ja "mitata muodonmuutos" voivat olla mahdollisia. Loogisia syy-yhteyksiä kuvataan peruskytkentöjen avulla. Loogisia peruskytkentöjä ovat JA-, TAI- ja EI-toiminnot sekä niiden yhdistelmät.

Fysikaalisessa tarkastelussa ilmenee loogisen sisällön lisäksi energia-, aines- ja/tai signaali-muunnoksien fysikaaliset riippuvuudet. Ensimmäisessä vaiheessa esitetään rakenteen päävujo ja vastaava yksinkertainen toimintorakenne. Seuraavaksi etsitään sivuvuot ja niiden vastaavat osatoiminnot. Lopuksi osatoiminnot kootaan laitteen toimintorakenteeksi. Rakenteen tulee olla mahdollisimman yksinkertainen, koska se yleensä johtaa yksinkertaisiin ja edullisiin ratkaisuihin.

### Vaikutusperiaatteiden hakeminen

Toimintorakenne konkretisoidaan hakemalla sopivia vaikutusperiaatteita. Vaikutusperiaate sisältää toiminnon toteuttamista varten tarpeellisen fysikaalisen ilmiön sekä geometriset ja aineel-



liset tunnusmerkit. Jokaiselle osatoiminnolle etsitään useita vaikutusperiaatteita, jotka myöhemmin yhdistetään vaikutusrakenteeksi.

Vaikutusperiaatteita etsitään tavanomaisesti seitsemällä eri menetelmällä: Kirjallisuustutkimuksella, luonnon järjestelmien analyysillä, tunnettujen teknisten systeemien analyysillä, analogiatarkastelulla, mittauksilla ja mallikokeilla, intuitiivisilla menetelmillä sekä diskursiivisilla menetelmillä.

Kirjallisuustutkimuksella etsitään tietoa tekniikan tasosta. Sopivia tietolähteitä ovat esimerkiksi ammattitietokirjat ja -aikakauslehdet, patenttitutkimukset sekä kilpailijoiden tuote-esittelyt. Tässä työssä on hyödynnetty ammattikirjallisuutta ja -julkaisuja.

Luonnon järjestelmien analyysissä tutkitaan luonnon muotoja, rakenteita ja ilmiöitä. Sopivat ratkaisu- ja konstruktioperiaatteet siirretään teknisiin rakennelmiin. Kehitettävään laitteistoon ei löytynyt sopivia malleja luonnosta, joten luonnon järjestelmiä ei hyödynnetty.

Tunnettujen teknisten systeemien analyysissä tutkitaan samankaltaisia tuotteita tai rakenneryhmiä, jotka kokonaan tai osittain vastaavat rakennetta jolle ratkaisua haetaan. Tällaisia voivat olla esimerkiksi kilpailijan tai oman yrityksen aiemmat tuotteet ja menetelmät. Menetelmän haittana on vaara pysyttäytyä tunnetuissa ratkaisuissa. Tässä työssä luettiin tutkimusraportteja muiden ydinvoimatoimijoiden tekemistä kalorimetrisistä lämpötehomittauksista. Näissä oli kuvailtu teknistä laitteistoa yleisellä tasolla, mutta kovin yksityiskohtaista kuvausta ei ollut saatavilla.

Mittausten ja mallikokeiden avulla kerätään kokeellista tietoa. Kokeissa luodaan todellista ilmiötä tai sen osaa vastaavat olosuhteet, jonka aikana mallin käyttäytymistä tutkitaan. Mallien valmistaminen usein kuuluu konstruktio toimintaan. Yrityksessä on tehty mallikokeita järjestelmän toiminnasta. Tästä kerättyä tietoa hyödynnetään kalorimetrin suunnittelussa. Mallikokeita voidaan tehdä myös virtuaalisuunnittelun avulla. Simulointia hyödynnetään työn lopputuloksen arvioinnissa.

Intuitiiviset menetelmät perustuvat suunnittelijan sattumanvaraiseen oivallukseen. Oivallus perustuu usein tietoihin ja kokemuksiin ja osuu yleensä ongelman ytimeen. Menetelmän epäkohdaksi on oivalluksen saaminen oikeaan aikaan. Oivalluksen saamista voidaan edistää monilla metodeilla. Useimmat niistä perustuvat vuorovaikutukseen ja yksinkertaisin tapa on keskustelu ja kriittinen väittely työkaverin kanssa. Työssä ongelman ratkaisu tehdään järjestelmällisin menetelmin, jolloin sattumanvaraisten oivallusten merkitys jää pieneksi. Toki monia ratkaisuvaihtoehtoja voi pitää oivalluksen tuloksena, mutta sen takana on ongelman järjestelmällinen analysointi.

Diskursiivisella menetelmällä ratkaisua osaongelmiin haetaan pienillä askelilla etenemällä. Eteneminen voidaan tehdä tutkimalla sovellettavaa fysikaalista ilmiötä tai erilaisten jäsentelykaavi-

oiden avulla. Fysikaalisen ilmiön tutkimuksessa ilmiö hajotetaan erillisvaikutuksiin, missä jokaisen muuttujan vaikutusta tutkitaan erikseen. Jäsentelykaavioita käytetään ongelmien ja ratkaisuvaihtoehtojen järjestelmälliseen etsimiseen. Kaavio laaditaan vallitsevan ongelman mukaan ja yksinkertaisimmillaan se sisältää osaongelmat ja niiden ratkaisuvaihtoehdot.

**Vaikutusperiaatteiden yhdistäminen**

Systemaattisen tuotekehityksen luonnosteluvaihe päättyy eri vaikutusperiaatteiden yhdistämiseen ja niiden arviointiin. Yhdistelyn perustana on toimintorakenne, josta ilmenee osatoimintojen väliset yhteydet ja järjestys. Yhdistämisen haasteena on tunnistaa vaikutusperiaatteiden väliset yhteensopivuudet ja kokonaisuutena taloudellisimmat ratkaisut.

Vaikutusperiaatteet kannattaa ryhmitellä samaan taulukkoon, mistä on helppo nähdä jokaisen osatoiminnon erilliskäsit. Mikäli ratkaisuvaihtoehtoja on runsaasti, kannattaa sopimattomat ratkaisut erottaa sopivista ratkaisusta. Sopivat ratkaisut ovat yhteensopivia tehtävän kanssa ja keskenään, täyttävät vaatimuslistan asettamat vaatimukset ja ovat toteutettavissa taloudellisesti.

Tässä vaiheessa ratkaisuvaihtoehdot ovat yleensä vielä liian keskeneräisiä, jotta lopullinen ratkaisuvaihtoehto voitaisiin valita. Lupaavimmista ratkaisusta tulee konkretisoida periaatteellinen ratkaisu. Tässä vaiheessa riittää, että hahmottelee ratkaisujen yksityiskohtaisen toimintaperiaatteen paperille.

Konkretisoitujen ratkaisujen paremmuutta verrataan toisiinsa pistearvioinnin avulla. Arvioinnissa tulee huomioida ratkaisujen soveltuvuus mahdollisimman laajalti ja puolueettomasti. Lisäksi vaikuttavat seikat tulee painottaa tärkeyden mukaan, jotta valinta perustuu oleellisiin ominaisuuksiin. Arviointi perustuu positiivisesti muotoiltuihin väittämiin, missä kaikki toivotut ominaisuudet kasvattavat ratkaisuvaihtoehdon pistepotia. Arviointikriteerit tulee johtaa tavoitteista ja arvioinnin tulisi voida tehdä numeerisella asteikolla. Tavoitteet saadaan vaatimuslistan vaatimuksista ja teknistä ominaisuuksista. Pahl ja Beitz ovat esittäneet taulukon 1 mukaisen ohjelman arviointikriteerien päätunnuksista (1986, 363).

**Taulukko 1. Vaatimuslistan päätunnukset (Pahl & Beitz 1986, 68).**

Päätunnus	Esimerkkejä
Geometria	Suuruus, korkeus, leveys, pituus, läpimitta, tilantarve, lukumäärä, järjestely, liitäntä, lisäys ja laajennus
Kinematiikka	Liiketapa, liikesuunta, nopeus, kiihtyvyys
Voimat	Voiman, suuruus, suunta ja useus, paino, kuorma, muodonmuutos, jäykkyys, jousto-ominaisuudet
Energia	Teho, hyötysuhde, häviö, kitka, ilmanvaihto, olosuureet, kuten paine, lämpötila, kosteus, lämmitys, jäähdytys, liitäntäenergia, varaaminen, työn tarve, energiamuunnos



Aines	Tulo- ja lähtötuotteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, apu-aineet, laatumääräykselliset aineet (elintarvikelaki yms.) Ainesvuo ja materiaalin kuljetus
Signaali	Tulo- ja lähtösignaalit, osoitustapa, käyttö- ja valvontalaitteet, signaalin muoto
Turvallisuus	Välitön turvallisuustekniikka, suojajärjestelmät, käyttö-, työ ja ympäristöturvallisuus
Ergonomia	Ihminen-kone-suhde: käyttö, käytöntapa, havainnollisuus, valaistus, muotoilu
Valmistus	Tuotantopaikkojen määräämät rajoitukset, suurin valmistettavissa oleva mitta, suosituin valmistusmenetelmä, valmistusväline, mahdolliset laatu- ja toleranssivaatimukset
Tarkastus	Mittaus- ja testausmahdollisuudet, erityiset määräykset (SFS, ASME, DIN, ISO TüV, muut ohjeelliset)
Asennus	Erityiset asennusohjeet, kokoonpano, lisäasennus, asennus rakennuspaikalla, perustukset
Kuljetus	Nosturien aiheuttamat rajoitukset, rataprofiili, koon ja painon mukaiset kuljetustiet, lähetystapa ja -ehdot
Käyttö	Meluttomuus, kulumisnopeudet, käyttö- ja markkina-alue, käyttöpaikka (esim. rikkipitoinen ilma, tropiikki...)
Kunnossapito	Huollon tarpeettomuus tai huoltojen lukumäärän ja ajan tarve, tarkastus, vaihdot ja kuntoonpano, maalaus, puhdistus
Kierrätys	Jälleenkäyttö, jälleenhyödyntäminen, päätevarastointi, poisto
Kustannukset	Sallitut maksimivalmistuskustannukset, työkalukustannukset, investoinnit ja kuoletukset
Määräajat	Kehitystyön loppu, välivaiheiden toimintaverkko, toimitusaika

Arviointiin voi syntyä virhettä jos arvostelija poikkeaa neutraalista asennoitumisesta. Tämän välttämiseksi arviointiin osallistuvat vaihtoehdot tulisi nimetä neutraalisti ja arviointiin tulisi osallistua useita eri henkilöitä eri osastoilta. Huonosti muotoillut arviointikriteerit voivat johtaa toisten vaihtoehtojen tahattomaan suosimiseen. Mikäli jokin arviointikriteeri ei sovi kaikille vaihtoehdoille, tulisi kriteeri muotoilla uudelleen tai jättää pois.

Myös epätäydelliset ja toisistaan riippuvat kriteerit vääristävät tuloksia. Epätäydelliset kriteerit eivät huomioi kaikkia oleellisia ominaisuuksia. Riippuvat kriteerit aiheuttavat ristiriitaisuuksia, sillä parantamalla jotain ominaisuutta aiheuttaa se toisen ominaisuuden heikentymisen. Koska arviointi perustuu yleensä suunnitelmiin, ei kaikkia ominaisuuksia tiedetä yksikäsitteisesti. Tätä voidaan pienentää vertailemalla ominaisuuksia keskenään ja arvioimalla suurimpien epävarmuuksien ominaisuudet sanallisesti.

Koska kalorimetri-konseptia on tutkittu kansainvälisellä tasolla suhteellisen paljon, vaikutusperiaatteiden löytäminen oli helppoa. Eroja syntyikin periaatteiden soveltamisessa, joiden välillä arviointi tehtiin. Koska eri ratkaisuvaihtoehtojen välillä oli paljon yhteisiä piirteitä, keskityttiin arvi-

oinnissa löytämään niiden erot. Arvioinnissa on käytetty Pahlin ja Beitzin esittämää päätunnuslistaa soveltuvalta osin.

Virheiden minimointia varten virhelähteet on tunnistettu ja huomioitu pistearvioinnin aikana. Lisäksi kalorimetrin toimintaperiaatteesta on käyty keskusteluita suunnittelutyöhön osallistumattomien henkilöiden kanssa. Näillä toimenpiteillä on pyritty varmistamaan suunnittelun puolueettomuus ja oikean toimintaperiaatteen valinta.

### **3.1.3 Kehittely**

Kehittelyssä suunnitellaan luonnostelun lopputuloksena syntyneen tuotteen kokoonpanorakenne yksikäsitteiseen muotoon. Viimeistään kehittelyn aikana täytyy valita työaineekset, vahvistaa päämitat, valmistusmenetelmät ja tarkistaa kolmiulotteiset yhteensopivuusehdot. Kehittely on ratkaisun rakennemuodon vahvistamista. Usein joudutaan tekemään mittakaavaisia alustavia ehdotuksia. Vaikka jokin muunnelma näyttää parhaimmalta, sitä voidaan parantaa muiden osaratkaisujen ideoilla (eteenkin heikkouksien kohdalta). Lopullisessa kokonaiskehityksessä on tarkistettava toiminnot, kestävyys ja tilankäytön sopivuus.

### **Rakennemuotoilu**

Rakennemuotoilun pääsäännöt ovat rakenteen yksikäsitteisyys, yksinkertaisuus ja turvallisuus. Yksikäsitteisessä rakenteessa vaikuttavien fyysikaalisten ilmiöiden syyn ja seurauksen suhde on selvillä ja niihin on varauduttu. Yksikäsitteisyyttä varten on tunnettava rakenteeseen kohdistuvan kuormituksen laatu, toistuvuus ja kesto. Esimerkiksi rakenteen lämpölaajeneminen on huomioitu suunnittelussa siten, ettei se aiheuta hallitsemattomia jännityksiä.

Yksinkertaisella rakenteella pyritään minimoimaan rakenneosien määrä, tekemään osista selviä piirteisiä ja pienentää kustannuksia. Rakenteen yksinkertaistaminen alkaa jo toimintorakenteen laatimisen aikana, sillä siinä pyritään mahdollisimman pieneen osatoimintojen määrään ja niiden välisten riippuvuuksien minimoimiseen. Kalorimetrin muotoilu perustuu laitteen toimintorakenteeseen ja muotoilussa on jätetty tilaa komponenttien sijoittamista varten.

### **Turvallisuus**

Laitteen turvallinen käyttö voidaan toteuttaa välittömän, välillisen ja opastavan turvallisuustekniikan avulla. Välittömän turvallisuustekniikan avulla pyritään ennaltaehkäisemään turvallisuutta vaarantavat tapahtumat varmistamalla toimintojen toteutuminen ja rakenneosien mekaaninen kestävyys. Laitteen turvallinen toiminta voidaan toteuttaa varman kestämisen, rajoitetun vahingon tai varajärjestelmän periaatteella.

Varman kestämisen periaatteella toimivat laitteet on mitoitettu kestämiään ehjänä kaikki ennakoitujen käyttöiän aikana esiintyvät rasitukset. Rajoitetun vahingon periaatteen mukaan toimiva



laite kykenee jatkamaan toimintaa käyttöhäiriön esiintyessä. On tärkeää, että vahingoittunut laite kykenee ylläpitämään turvallisuuden kannalta kriittiset toiminnot, vikaantuminen voidaan havaita ja havainnon perusteella voidaan arvioida tilanteen turvallisuusmerkitys. Varajärjestelmäperiaatteella toimivan laitteen kaikki tärkeimmät toiminnot on varmennettu toisella, rinnakkaisella toiminnolla. Esimerkiksi pumpun toiminta on varmennettu toisella, samankokoisella pumpulla.

Kalorimetrin rakenne on mitoitettu varman kestämisen periaatteella, jolloin laite kestää siihen kohdistuvat suunnittelukuormitukset. Lisäksi polttoaineen jäähdytys on varmistettu useilla toisistaan riippumattomilla menetelmillä. Näillä menetelmillä laitteen käyttämisestä tehdään mahdollisimman turvallista.

Välilliseen turvallisuustekniikkaan kuuluvat suojajärjestelmät, -elimet ja -laitteet. Suojajärjestelmät toimivat vaaratilanteissa aktiivisesti käynnistäen suojatoiminnot. Suojaelimet eivät tarvitse ulkoista energiaa toimiakseen, mutta pystyvät laukaisemaan suojatoiminnon. Tällainen on esimerkiksi painejärjestelmässä oleva ylipaineventtiili. Suojalaitteet estävät ihmisiä tai esineitä joutumasta vaarallisiin paikkoihin. Laitteen jäähdytys varmistetaan komponenteilla, jotka menevät turvalliseen tilaan ulkoisen ohjausenergian kadotessa.

Opastava turvallisuustekniikka kykenee vain varoittamaan ja opastamaan käyttäjää. Suunnittelussa tuleekin käyttää ensisijaisesti välitöntä turvallisuustekniikkaa ja vasta vakaan harkinnan jälkeen välillistä ja opastavaa tekniikkaa.

Kalorimetrin toiminta ei voi täysin perustua välittömän ja välillisen turvallisuustekniikan käyttöön. Mittaustoiminnon suorittaminen vaatii aktiivista ohjausta ja valvomista. Käyttäjille onkin järjestettävä käyttöohjeet ja -koulutus ennen mittausten suorittamista.

### **3.2 Tietokoneavusteinen simulointi**

Työn tuloksena syntyvän konseptin soveltuvuus mittauksiin verifioidaan laskentamallin avulla. Verifioimiseen käytetään Apros-ohjelmistoa, joka on kehitetty dynaamisten voimalaitosjärjestelmien mallintamiseen ja simuloimiseen. Apros on kelpoistettu useilla eri laitoksilla vertaamalla simuloinnilla saatuja tuloksia laitoksilla tehtyihin mittauksiin. (Apros 2012)

Simulointimallin rakentamisessa hyödynnetään Fortum Power & Heat Oy:n mallinnusosaamista, joten tässä työssä ei kuvata mallin rakentamista tai ohjelmiston toimintaa.





## 4 Tulokset

### 4.1 Kalorimetrin toiminnalle asetettavat vaatimukset

Kalorimetrin toiminnan on perustuttava monipuoliseen vaatimuslistaan, joka huomioi ydinturvallisuuden, mittaustekniset näkökohdat, laitteen käsittelyn, käyttöolosuhteet ja viranomaisvaatimukset. Laajemman tarkastelun jälkeen kappaleen lopussa esitetään vaatimuslista, mihin on kerätty kootusti kaikki vaatimukset ja toivomukset.

#### Polttoaineen jäähdyttäminen

Yksittäisistä vaatimuksista tärkein on polttoaineen jäähdytyksen varmistaminen. Jäähdytyksen on perustuttava veden luonnolliseen kiertoon. Tätä varten kalorimetrin mittauspiiristä on oltava vapaa yhteys polttoainealtaan veteen laitteen lepotilassa. Lepotilaksi katsotaan tilanne, mihin laite asettuu kaikkien ohjausvoimien kadottua. Lisäksi kalorimetrin mittauspiiri ei saa mahdollistaa höyrytaskua, joka voisi syrjäyttää veden polttoaineen ympäriltä.

Polttoaineen jäähdytys on oltava turvattuna myös yllättävissä tilanteissa, kuten laitteen häiriötilanteissa ja palohälytyksen aikana. Tähän päästään käyttämällä toisistaan riippumattomia mekaniismeja, jotka kaikki johtavat turvalliseen tilaan. Laitteen on toimittava häiriötilanteessa siten, että se palautuu turvalliseen tilaan ilman ulkoista ohjausta.

Turvallisuutta voidaan parantaa riittävällä kiehumisvaralla, jonka aikana laitteen vikaantuminen voidaan korjata. Kiehumisvara vaikuttaa kalorimetrin sisällä olevan polttoaineen jälkilämpöteho, lämpövuoto laitteesta altaaseen ja rakenteiden sitoma lämpömäärä. Riittäväksi korjausajaksi on sovittu kahdeksan tuntia (Routamo & Toppila 2007).

#### Polttoaineen tukeminen

Mittauksesta ei saa aiheutua polttoaineeseen ylimääräisiä kuormituksia. Polttoaineen tasaisella jäähdytyksellä vältetään lämpörasitukset ja hyvällä suunnittelulla voidaan minimoida fyysiset rasitukset. Fyysisiä rasituksia voi tulla polttoaineen siirtojen aikana, esimerkiksi törmäyksistä liikkuvien osien kanssa, polttoaineen kiilautumisesta kalorimetrin pesään tai kalorimetrin kaatumisen tai rikkoutumisen seurauksena.

Polttoaine säilytetään varastotelineissä pystysuorassa asennossa ja siirrot tehdään tarraamalla kiinni nipun yläosaan. Tästä syystä on luonnollista, että polttoaine on myös kalorimetrissä pystysuorassa asennossa. Polttoaineen on asetuttava mittalaitteeseen pystysuoraan asentoon ja sen kiertäminen on estettävä. Polttoaine onkin tuettava ylä- ja alaosaan kalorimetrin pesään. Suunnittelussa on otettava huomioon kalorimetrin valmistuksen epätarkkuudesta johtuva mah-

dollinen vinoutuma. Tämä voi johtaa tilanteeseen, missä kalorimetrin pesä on vinossa ympäristöön nähden. Tällöin polttoaine voi kiilautua vinoon nostosuuntaan nähden.

### **Mittaus**

Kun polttoaineen eheys on varmistettu, on seuraavaksi tärkein asia mittaus. Kalorimetrin rakentamisen takana on vain ja ainoastaan ajatus saada mitattua polttoaineen jälkilämpöteho. Mikäli tätä ei voida tehdä, on polttoaineen siirtäminen turha riski ja kalorimetrin rakentaminen tarpeetonta.

Mittauksen toiminnalliset rajat on määritetty Routamon ja Toppilan tekemässä kalorimetrin soveltuvuus selvityksessä (Routamo & Toppila 2007). Selvityksen mukaan haluttu mittausalue ja -tarkkuus ovat 50...200 W ja  $\pm 5\%$ . Mittausaika on yksi työpäivä, mikä sisältää polttoaineen siirrot varaston ja kalorimetrin välillä.

Mittauspiiristä on mitattava vähintään paine ja lämpötila polttoaineen tulo- ja lähtöpuolelta, sillä nämä ovat oleelliset tiedot laitteen tilanteen arvioimiseksi. Näiden lisäksi mittausjärjestelmään kuuluu muita mittauksia, joiden tarkoitus on jälkilämmön mittaaminen. Mittauksen kulku on kuvattu tarkemmin kappaleessa 2.5.1.

Mittaus on yksi tärkeimmistä turvallisuustoiminnoista, sillä sen avulla saadaan tietoa laitteen sisäisistä tapahtumista. Kuten kappaleessa 2.7 esitetty Paksin tapaus osoittaa, operaattorilla on oltava tieto laitteen tilasta jatkuvasti, jotta käyttö on turvallista. Mittaukseen liittyvä tieto kerätään PC-pohjaisella valvontajärjestelmällä, minkä kautta myös toimilaitteiden ohjaus hoidetaan käsiohjauksella (Routamo & Toppila 2007). Turvallisuuden kannalta on tärkeää, että laitteeseen tulee toisella mittausperiaatteella toimiva lämpötilamittaus. Mittauksen tulee toimia valvontajärjestelmästä riippumatta, jotta kaikki mittaukset estävä yhteisvika olisi mahdollisimman epätodennäköinen.

### **Olosuhteet**

Mittauslaitteisto sijoitetaan Loviisan käytetyn polttoaineen varastossa sijaitsevaan kuormausaltaaseen polttoaineen varastoaltaan läheisyyteen. Allas on 12 metriä syvä ja siinä on 11 metrin vesikerros.

Polttoaineen yläpuolella on oltava jatkuvasti vähintään 3,5 m vettä säteilysuojana, myös siirtojen aikana (Mayer 2009). Tämä rajoittaa lähinnä kalorimetrin suurinta mahdollista korkeutta, sillä varaston suunnittelussa on huomioitu riittävät allassyvyudet. Allassyvyydellä 11 m, kalorimerin suurimmaksi korkeudeksi voidaan sallia 4,3 m. Käytännössä tähän on lisättävä marginaalit polttoaineen turvallisiin siirtoihin, jolloin suurin korkeus rajautuu 4,0 metriin.



Allasveden lämpötila on 50 °C ja laite on mitoitettava häiriötilanteiden varalta veden kiehumispisteeseen, eli 100 °C saakka (Mayer 2009; Routamo & Toppila 2007). Koska lämmön siirtyminen vedessä on paljon suurempaa kuin ilmassa, voidaan kalorimetrin ulkokuoren lämpötilan olettaa olevan yhtä suuri altaan lämpötilan kanssa ja sisäkuoren yhtä suuri mittausspiirin kanssa. Tämän seurauksena ulko- ja sisäkuoren välille voi muodostua lämpöjännityksiä, jotka on huomioitava suunnittelussa.

Mittauksen aikana laite altistuu ionisoivalle säteilylle, joten rakenneaineiden on kestettävä säteilyä. Mikäli suunnittelussa esiintyy tarve käyttää säteilyä heikosti kestäviä aineita, kuten esimerkiksi tiivisteissä, on niiden säteilynkestävyys arvioitava erikseen. Laitoksen turvallisuusarvion mukaan kaikki allasveden kanssa kosketuksiin joutuvat laitteet ja pinnat on valmistettu ruostumattomasta teräksestä (Mayer 2009, 14). Laitteesta ei saa irrota likaa tai irto-osia altaaseen.

### **Käsittely**


Tässä yhteydessä käsittelyllä tarkoitetaan kalorimetrin kokoonpanon, käytön, siirtojen ja nostojen lisäksi polttoaineen siirtoja mittauksen yhteydessä. Suunnittelussa tulee huomioida riittävällä laajuudella laitteen elinkaaren aikana esiintyvät tarpeet.

Koska kalorimetrin mitat ovat suhteellisen suuria, ei sen käsittely onnistu käsivoimin. Valmiissa laitteessa ja sen suurimmissa osakokoonpanoissa on oltava selvät nostopisteet. Kalorimetrin liikuttelu käytetyn polttoaineen varastossa voidaan tehdä hallitilassa olevan nosturin avulla. Siirto varastoon voidaan tehdä pystyasennossa, jolloin laitteiston kokoonpano voidaan tehdä missä tahansa laitosalueella.

Kalorimetrin hankalista käyttöolosuhteista johtuen sen toimilaitteet on varustettava kaukokäyttöisillä ohjauksilla. Ohjausvoiman hävityessä toimilaitteiden on palauduttava kokonaisuuden kannalta turvalliseen asentoon. Ohjaukset tehdään käsin PC-pohjaisen valvontakeskuksen kautta. Laitteen saaminen turvalliseen tilaan kaikissa käyttötilanteissa varmistetaan mahdollisuudella avata mittausspiirin kansi manuaalisesti altaan reunalta. Laite on muotoiltava siten, että se on helppo puhdistaa. Siihen ei saisi jäädä taskuja, joihin epäpuhtaudet voisivat saostua. Puhdistamiseen tulisi voida käyttää painepesuria.

### **Vaatimuslista**

Kuvaan 19 on kerätty vaatimukset kootusti. Vaikka mittauksien onnistuminen on koko laitteiston ydinajatus, ovat sen vaatimukset ainakin osittain ristiriidassa turvallisuuden kanssa. Esimerkiksi mittaukset olisi helppo tehdä järjestelmästä, missä lämpötilamuutokset ovat nopeita. Tämä on kuitenkin ristiriidassa riittävän korjausajan kanssa. Tämän takia polttoaineen turvallisuutta varmistavat vaatimukset ovat ehdottomia ja mittauksia edistävät vaatimukset toiveita. Näin on helppo varmistaa oikeiden vaatimusten huomioimisesta.

		1. Painos maaliskuu 2012	
		Vaatuslista kokonaistehtävälle: Kalorimetri	s.1/1
Muutos	V/T	Vaatimukset (V=vaatimus, T=toive)	Tärkeys *)
	V	Käyttö- ja suunnittelulämpötila: 50/100 °C	
	V	Suunnittelussa on huomioita altaan hydrostaattinen paine	
	V	Mitoitus VVER-440 polttoaineen mukaan: AV144 L = 3217 mm	
	T	Mittausalue ja -tarkkuus: 50...200 W ± 5 %	***
	T	Mittaus on kyettävä suorittamaan työpäivän aikana (8 h)	***
	V	Veden virtauksen tulee olla luonnollinen, eli ylöspäin (lämpötilaerojen aiheuttamiin tiheyseroihin perustuva)	
	V	Laitteen käyttäjällä on oltava reaaliaikainen tieto laitteen sisäisistä olosuhteista: (lämpötila, paine, jäähdytteen virtaus)	
	V	Laite ei saa aiheuttaa polttoaineeseen ulkoisia rasituksia	
	V	Häiriötilanteissa laitteiston on mentävä turvalliseen tilaan, eli vähintään luonnon jäähdytekierto säilyy	
	V	Kansi on voitava avata käsin altaan reunalta	
	V	Kiehumisvara niin suuri, että voidaan sallia 8 h korjausaika	
	V	Täytettävä kaikki viranomaisvaatimukset	
	V	Rakenteen suurin mahdollinen korkeus 4 m	
	V	Toimilaitteiden on oltava kaukokäyttöisiä	
	V	Laitteen on oltava vakaa kaikissa käyttötilanteissa (korkea ja hoikka rakenne, kelluvuus)	
	V	Laitteessa on oltava selkeät ja kestävät nostopisteet	
	T	Laite on säteilysuojellisesti turvallinen: (ei aktivoidu, ei voi nostaa polttoaineen ollessa sisällä)	**
	V	Materiaalina on käytettävä ruostumatonta terästä	
*) Toiveen tärkeys: *** = tärkeä, ** = toivottava, * = hyödyllinen			

Kuva 19. Vaatuslista.



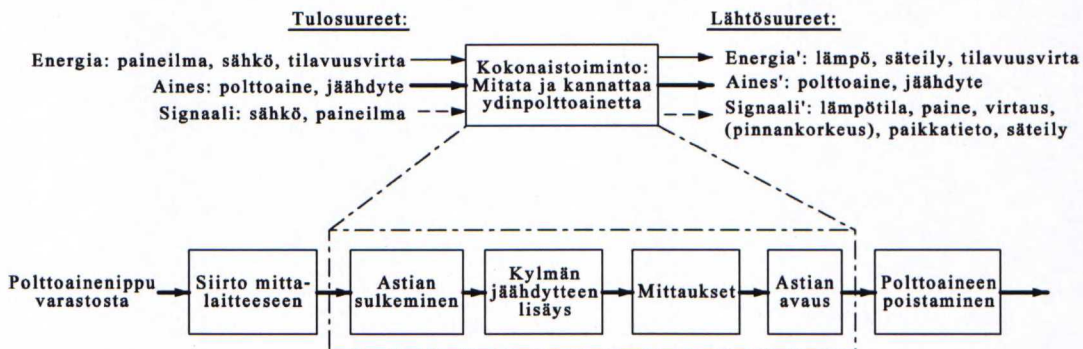
## 4.2 Kalorimetrin toimintorakenne

Kalorimetrin toimintaa voidaan tarkastella mittauksen ja laitteen elinkaaren kannalta. Yksityiskohtainen tarkastelu kannattaa tehdä laitteen tärkeimmästä toiminnosta, eli mittauksesta. Tarkastelussa käydään yksityiskohtaisesti läpi osatoimintojen väliset yhteydet ja mittauksen vaatimat signaalit. Tämän lisäksi on syytä tehdä tarkastelu laitteen eliniän aikana kokemista vaiheista ja toimenpiteistä. Näiden tarkastelujen avulla saadaan huomioitua laitteen toiminnolliset tarpeet, mutta esimerkiksi käyttäjän tarpeita menetelmä ei huomioi.

### Lämpötehon mittaaminen

Mittauslaitteiston päätoiminto on mitata käytetyn ydinpolttoaineen jälkilämpöteho. Tätä varten rakennetaan kalorimetri, jonka sisälle tutkittava polttoaine tulee. Laitteen on kannatettava polttoaineenippua koko mittauksen ajan. Mittausta varten kalorimetri on varustettava mittausantureilla ja mittausta tukevilla oheislaitteilla.

Mittaustoiminto vaatii energiaa toimiakseen. Tässä vaiheessa ei voida vielä tietää lopullisia energian tuontitapoja, mutta paineilma, sähkö ja nestevirtaus ovat lupaavimmat tavat. Mittauksen vaatimat ainekset ovat mitattava polttoaine ja mittauksen väliaineena toimiva jäähdyte. Kalorimetrin toimilaitteiden ohjaussignaalit voidaan toteuttaa esimerkiksi sähköllä tai paineilmalla. Mittauksen kokonaistoiminto on kuvassa 20.



**Kuva 20. Kalorimetrin kokonaistoiminto.**

Kuvassa kokonaistoiminto on jaettu osatoimintojen ketjuun. Ketju kuvaa mittausprosessin vaiheita ja niiden välistä järjestystä. Pistekatkoviivan sisälle jäävät osatoiminnot kuuluvat mittalaitteen toimintaan. Polttoaineen siirrot suoritetaan erillisellä siirtolaitteistolla, eikä niitä siis kuvata toimintorakenteessa. Toimintorakenteen perustana on käytetty kappaleessa 2.5.1 esitettyä toimintamallia.

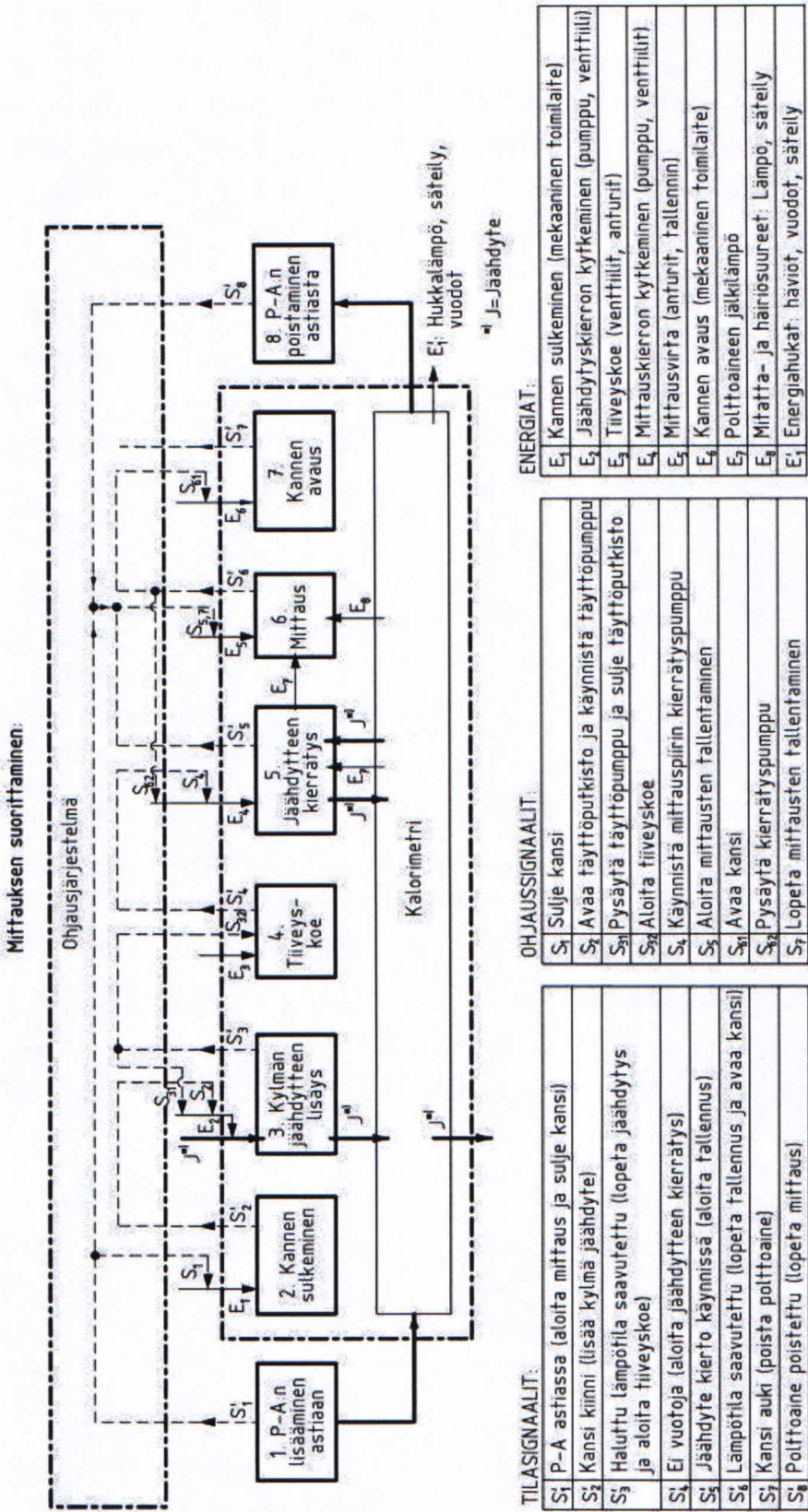
Tarkastelusta saadaan karkea kuva mittauksen kulusta. Tämä ei kuitenkaan vielä anna paljoakaan lisäarvoa suunnittelua varten. Onkin syytä kasvattaa tarkkuutta lisäämällä mittauksen vaatimat energia-, aines- ja signaalivuot.

### **Mittauksen vaatimat toiminnot**

Yksityiskohtaisemmassa tarkastelussa ohjausjärjestelmä on erotettu erilleen mittauslaitteistosta. Kuvassa 21 ohjausjärjestelmä on merkitty paksulla pistekatkoviivalla. Mittauksen signaalit kulkevat ohjausjärjestelmän kautta ja ne on merkitty katkoviivalla. Signaalit on yksilöity numerokoodilla, joiden selitykset ovat merkitty kuvaan. Tilasignaalit välittävät tietoa prosessista ohjausjärjestelmälle. Ohjaussignaalit puolestaan ohjaavat prosessia haluttuun suuntaan toimilaitteiden välityksellä.

Mittauksen vaiheet 2...7 ja niihin kuuluva mekaniikka on rajattu pistekatkoviivalla. Edelliseen tarkasteluun verrattuna mittauksesta on erotettu tiiveyskoe ja jäähdytteen kierrätys. Tällä tavoin on helpompi yksilöidä mittauksen vaiheet ja signaalit.



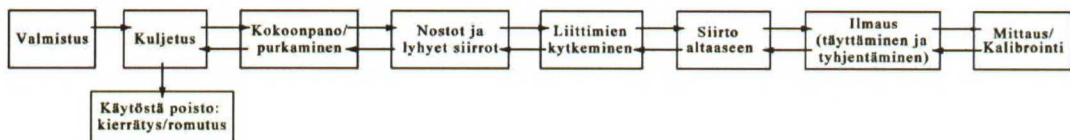


Kuva 21. Kalorimetrin toimintorakenne.

Edellä esitettyssä toimintorakenteessa toimilaitteita ei ole esitetty erillisinä toimintoina. Toimilaitteita tarvitaan jokaisen signaali- ja energiavuon risteyskohdassa. Ohjausjärjestelmän suunnittelu ei kuulu tämän työn piiriin, mutta kaaviota voidaan hyödyntää sen suunnittelussa. Kaavios- ta voidaan erottaa kalorimetrin pääkomponentit: kalorimetrin astia, kansimekanismi, putkisto varusteineen ja mittauslaitteisto.

## Elinkaari

Laitteen elinkaari kattaa kaikki vaiheet valmistuksesta käyttöön ja käytöstä poistoon. Tarkaste- lun ulkopuolelle on jätetty suunnittelu. Sitä ei ole huomioitu, koska tässä tapauksessa oleellista on tunnistaa fyysisen tuotteen kokemat vaiheet ja tilanteet elinkaaren aikana. Huoltoa ei ole erikseen merkitty, koska sitä voidaan tehdä lähes kaikissa työvaiheissa ja rakenteen huolletta- vuus huomioidaan valmistettavuuden arvioinnin yhteydessä. Tuotteen elinkaari esitetään kuvas- sa 22.



**Kuva 22. Kalorimetrin elinkaari.**

Kuvassa olevat nuolet kertovat tapahtumien kulkusuunnan. Ainoastaan tuotteen valmistus ja käytöstä poisto ovat kertaluontoisia tapahtumia. Muut tapahtumat voivat toistua laitteen käyt- töän aikana. Kuljetuksen ja mittauksen välille muodostuu toistuva lenkki, joka voi toistua use- asti eliniän aikana.

Kuljetuksen ja lyhyiden siirtojen välinen ero on siirron pituus. Kuljetukset tehdään kuorma- autolla tai muulla vastaavalla pitkän matkan kuljetusvälineellä. Käytännössä tällä on vaikutusta kalorimetrin kuljetusasentoon, sillä esimerkiksi maantiekuljetuksissa maksimikorkeus vaihtelee 2,4 ja 2,0 m välillä ja kalorimetrin korkeus on noin 4,0 m (VR Transpoint 2011; Kiitolinja 2011).

Ennen siirtoa altaaseen kalorimetri täytyy kytkeä mittausjärjestelmään kiinni. Tämä tarkoittaa vesitiiviitä läpivientejä laitteiston rungon läpi. Läpivientejä suunniteltaessa on huomioitava ve- den paine, käyttölämpötila, lämmöneristys, säteilynkestävyys ja sisä- ja ulkokuoren väliset erot lämpölaajenemisessa.

Kalorimetri on täytettävä vedellä altaaseen laskemisen yhteydessä, jolla varmistetaan laitteen hallittu upottaminen. Upotuksen jälkeen laitteistoon kuuluva putkisto on ilmattava. Ilmataskut putkistossa häiritsevät jäähdytyskiertoa ja mittauksia. Nostettaessa altaasta kalorimetri on tyh-



jennettävä vedestä. Vesi aiheuttaa ylimääräistä kuormitusta siirroissa ja se on tyhjennettävä jossain vaiheessa.

Kalibroinnin tarkoituksena on määritellä kalorimetristä karkaavan lämpötehon määrä. Mittalaitteen kalibrointi vastaa työvaiheiltaan jälkilämpötehon mittaamista. Mittauksessa polttoaine on korvattu kalibrointielementillä. Elementin on vastattava lämpöteknisiltä ominaisuuksiltaan mahdollisimman tarkasti polttoaineniippua. Tuntemalla elementin ja polttoaineniipun ominaisuudet, voidaan pienet erot kompensoida laskennallisilla menetelmin.

### **Yhteenveto**

Mittauslaitteiston pääkomponentit ovat kalorimetrin astia, kansi ja putkisto varusteineen. Näiden lisäksi tarvitaan mittaustietojen keräys- ja tallennuslaitteiston ohella kalibrointielementti. Koska laitteisto joudutaan välillä poistamaan mittaustaikalta, on se varustettava purettavilla liitäntöillä. Laitteen kokoaminen ja purkaminen tulisi olla mahdollisimman helppoa ja johdonmukaista.

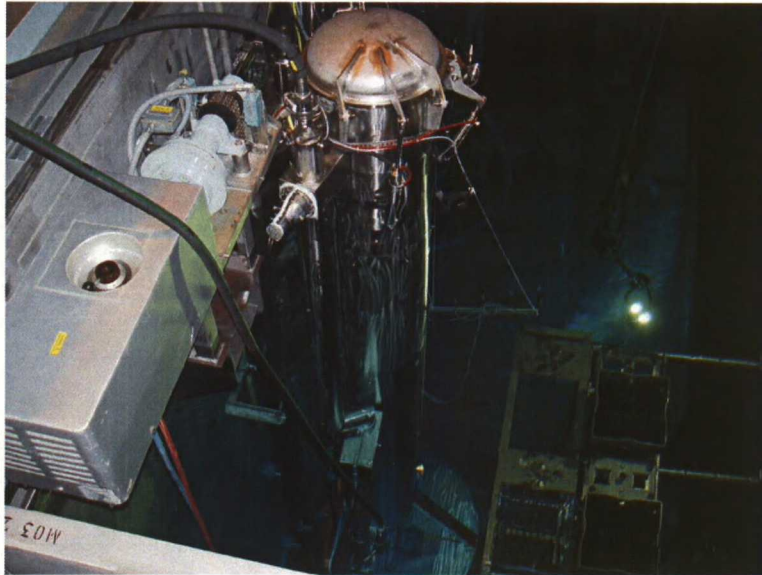
Kalorimetrin astian tehtävänä on tukea polttoainetta, ohjata jäähdytteen virtausta, estää vuodot sekä eristää mittauspiiri altaasta. Altaaseen laskemista varten sen tulisi olla helposti täytettävissä vedellä. Kannen tehtävänä on mahdollistaa polttoaineen siirtäminen kalorimetriin, astian tiivistäminen ja lämmön eristäminen. Kannen tulee olla kaukokäyttöinen ja sen asento on voitava varmistaa pinnalta käsin. Sen toimintamekanismin on oltava luotettava ja mahdollistettava käsi-ikäyttöisyys.

Putkiston ja sen varusteiden tehtävänä on ohjata ja ylläpitää jäähdytekiertoa. Jäähdytekierrasta ei saa vuotaa altaaseen jäähdytettyä ja lämmön siirtyminen tulisi olla mahdollisimman vähäistä. Putkistolla on tärkeä tehtävä mahdollistaa jäähdytteen luonnonkierto häiriötilanteissa. Putkiston suunnittelussa on huomioitava ilmaus altaaseen laskemisen jälkeen.

Mittauslaitteiston tehtävänä on kerätä tietoa kalorimetrin tapahtumista. Toiminnan kannalta on tärkeää, että anturit mittaavat toivottua suuretta luotettavasti. Mittauksen tarkkuutta voi heikentää anturin väärä sijainti, polttoaineen korkea säteilytaso, antureiden vanheneminen ja huonot kytkennät. Kalibroimalla mittalaitteisto tunnetun lämpötehon avulla voidaan laitteen suorituskyvystä varmistua.

## **4.3 Tunnetun järjestelmän rakenneanalyysi**

Suunnittelun vertailupohjaksi sopiva laitteisto SKB:n rakentama kalorimetri, joka on esitetty kuvassa 23. Tämä on sopiva malli, koska laitteistossa on paljon yhteneväisyyksiä suunniteltavan laitteen kanssa ja Ruotsin malli on kehitetty aikaisempia kalorimetrejä hyödyntäen. Laitteen tarkempi kuvaus löytyy kappaleesta 2.4.3. Rakenneanalyysissä on hyödynnetty kirjallisen aineiston lisäksi SKB:ltä saatuja esittelyaineistoja.



**Kuva 23. SKB:n kalorimetri (Aissa 2010a, 5).**

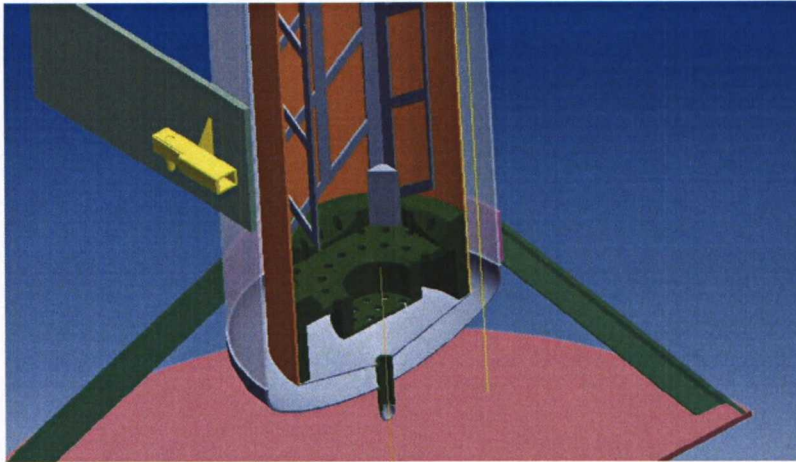
#### **Runko ja polttoaineen tukeminen**

Kalorimetrin runko koostuu kahdesta sisäkkäisestä lieriöstä, joiden välissä on polyuretaanilla täytetty eristetila. Sisemmän lieriön halkaisija on 0,33 m ja mittauspesän sisäkorkeus 4,5 m kokonaiskorkeuden ollessa 5 m. Kalorimetrillä mitataan kahta erityyppistä polttoainetta, jota varten laitteessa on lisäohjain pienempää polttoainetyyppeä varten. Kuvissa 24 ja 25 on esitetty rakenteen kokoonpano. (Sturek & Agrenius 2006, 11)



**Kuva 24. SKB:n kalorimerin yläosan poikkileikkaus (Sturek 2008).**





**Kuva 25. SKB:n kalorimetrin alaosan poikkileikkaus (Sturek 2008).**

Kuvasta eristetilan paksuudeksi voidaan arvioida noin 60 mm. Läpiviennit ja kiertoputkisto on liitetty astiaan hitsaamalla. Polttoaineen tukeminen on hoidettu ylä- ja alaosaerillisillä ohjaimilla. Alhaalla on rei'itetty pohjalevy, missä on viistetty ohjain polttoaineelle. Ylhäällä on ohjainlevyt, jotka myös estävät polttoaineen pyörähtämisen mittalaitteessa.

Laitteen paino kohdistetaan jalustan lisäksi kahteen korvakkeeseen, jotka tukeutuvat altaan reunassa olevaan johteeseen. Korvakkeet ja muut varusteet on liitetty kalorimetrin runkoon hitsaamalla. Jalustana on yhdeltä sivulta viistetty pyöreä levy, joka on kiinnitetty runkoon kolmen jalan avulla. Levyn ja kalorimetrin rungon väliin on jätetty tilaa kiertoputkistolle. Kiertoputkisto kulkee osittain kuorien välissä, mutta pääosin se kiertää astian ulkopuolella. Läpiviennit sisä- ja ulkokuoren välillä on tehty hitsaamalla kiinteät yhteydet kuorien väliin. Yhteydet sijaitsee astian ylä- ja alaosassa.

Sisälieriön kiinnittyminen ulkolieriöön jäykästi ylä- ja alaosaerillisistä voi aiheuttaa rakenteeseen jännityksiä. Varsinkin erisuuruiset lämpölaajenemiset voi aiheuttaa suuria jännityksiä rakenteeseen. Kiinteät metalliyhteydet kuorien välissä toimivat myös lämpösilloina mittauspiiristä altaaseen. Mittauspiirin eristykseen käytettävä polyuretaanieriste murenee polttoaineesta lähtevän säteilyn seurauksena (Sturek 2008).

### **Kansi ja käyttömekanismi**

Kannen tarkoitus on olla vesitiivis eriste mittauspiirin ja allasveden välillä. Kannen käyttö- ja lukitusvoimana toimii paineilma. Avaus hoidetaan yhdellä ja lukitus kolmella sylinterillä. Ongelmatilanteissa lukitusvoima katoaa, mutta kansi jää kiinni-asentoon. Lukituksen kiinni-asento voidaan todeta rajakytkimillä. Lukitusmekanismi on kiinnitetty runkoon, jolloin samalla mekaniismilla voidaan lukita kalibrointielementtiin kuuluva kansi. Kannen tiivistys on tehty tiivisteuralla ja -renkaalla, kuvan 26 mukaisesti.



**Kuva 26. SKB:n kalorimetrin yläosa (Sturek 2008).**

Kannen saranointi on tehty "jäykästi", jossa nivelet on kiinnitetty hitsaamalla runkoon ja kanteen. Kiertoliike tapahtuu jäykän akselin ympäri, jolloin kannen asento tiivistepintaan nähden riippuu saranan asennustarkkuudesta. Asennusvirheet johtavat kannen asettumiseen vinoon tiivistepintaan nähden ja epätoivottuihin vuotoihin.

#### **Putkisto ja sen varusteet**

Putkisto kiertää suurimmaksi osaksi kalorimetrin ulkopuolella ja se on eristetty vesitiiviillä rakenteella. Vesitiiviin kuoren ja putkiston välissä on käytetty polyuretaania eristeenä. Pumppu on myös koteloitu ulkopuolisen kiertoputkiston yhteyteen. Yhteys pinnalle on hoidettu kahdella letkulla, jotka liittyvät kiertoputkistoon kalorimetrin ylä- ja alaosaan.

Jäähdytteen kierrättämiseen kalorimetrissä käytetään magneettivetoista keskipakoispumppua, jonka nimellistuotto on 60 l/min. Kalorimetrin täyttö ja jäähdytys mittauskierron alussa tehdään säädettävällä pumpulla, jonka tuotto voidaan säätää välillä 0-20 l/min. Virtauksen määrä mitataan kalibroidulla virtausmittarilla. (Sturek & Agrenius 2006, 11)

Putkisto oli varustettu kalvoventtiileillä, joissa kuitenkin esiintyi vuotoja. Ne vaihdettiin myöhemmin palloventtiileiksi (Sturek 2008, 30). Palloventtiilien käytössä ei ole esiintynyt ongelmia.

Putkiston rakentaminen on vaikeaa kaksoisseinämäiseen rakenteeseen. Koska kaikkien läpivientien on oltava vesitiiviitä niin sisä- kuin ulkokuoren kanssa, on kokoonpanojärjestys mietittävä tarkasti. Lisäksi rakenteen purkaminen vaatii putkiston katkaisemisen, jolloin huoltotyöt ovat haastavia. Ongelmaksi voi muodostua hitsausliitosten tiiveyden tarkastaminen, varsinkin kun vuodot tapahtuvat astian eristetilaan.



## Mittauslaitteisto

Kalorimetrissä on 16 lämpötilanmittauspistettä. Mittaukset tehdään PT-100 tyyppisillä vastuslämpötila-antureilla. Kahdeksan anturia on kalorimetrin polttoainekammiossa, neljä anturia mittaa sisä- ja ulkokuoren lämpötilaa, kaksi on laitteen ulkopuolella ja kaksi jäähdytyskierrossa. (Sturek & Agrenius 2006, 11-12)

Laitteistosta karkaavaa gammavuota mitataan 5 anturilla laitteen ulkopuolella. Jokainen anturi on asetettu eri etäisyydelle ja niiden paikkaa voidaan säätää korkeussuunnassa 10 eri kiinteään asemaan ja kiertämällä 90° laitteen ympärillä. (Sturek & Agrenius 2006, 11-12)

Johdot mitta-antureille viedään kalorimetrin yläosassa olevien läpivientien kautta. Läpiviennit on tiivistetty kumilla. Lämpötila-anturit vaikuttivat jäähdytevirtaukseen (Sturek 2008).

## Kalibrointi

Laitteiston tarkkuuden määrittämistä varten on rakennettu kalibrointielementti. Elementti laskeaan polttoainepesään ja astia suljetaan erillisellä kannella. Elementti lämmittää mittauspiiriä sähkövastuksen avulla ja erillisessä kannessa on läpiviennit sähkökytkentöjä varten. Vastuksen lämpöteho säädetään sähköön syöttöä muuttamalla ja tehon suuruus varmennetaan sähköön syöttöä mittaamalla. Kalibrointielementti ja kansi muodostavat yhtenäisen rakenteen, jota voidaan liikutella kannessa olevasta nostokorvakkeesta.

Tällainen menetelmä on hyvä, sillä kalibrointi ei vaadi laitteen nostamista altaasta. Kalibroinnin luotettavuuden kannalta on hyvä, että olosuhteet vastaavat suoraan mittauksen aikaisia olosuhteita. Lisäksi laitteiston toiminta voidaan testata kalibrointielementillä mittausten välissä.

## Yhteenveto

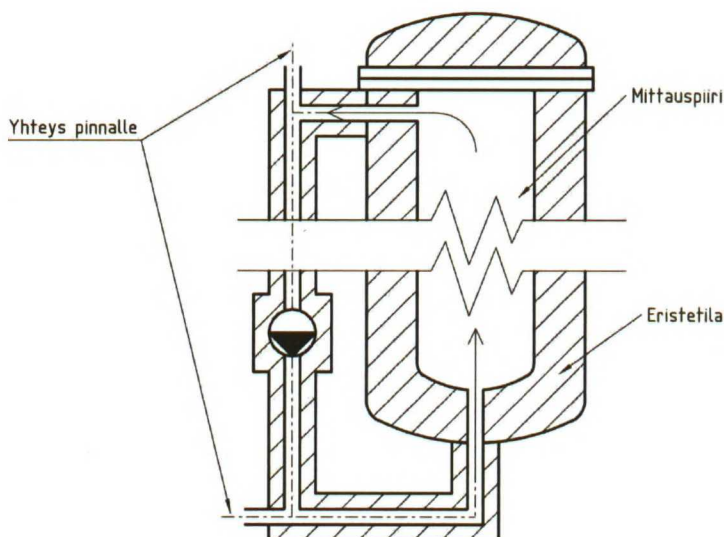
Ruotsissa SKB:n rakentamaa kalorimetria on käytetty mittauksiin ja se on todettu toimivaksi. Tämä todistaa menetelmän toimivuuden ja antaa hyvän lähtökohdan uuden kalorimetrin suunnitteluun. Kuitenkin SKB:n kalorimetrin rakenne on monimutkainen ja vaikeasti huollettava. Tämän vuoksi eteenkin laitteen rakenteen yksinkertaisuuteen tulee kiinnittää huomiota. SKB:n kalorimetrin ominaisuuksien yhteenveto on taulukossa 2.

**Taulukko 2. SKB:n kalorimetrin ominaisuudet.**

Hyvää	Huonoa
Todistettu toimivaksi	Rakenne on hankala valmistaa
Polttoaineen tukeminen hoidettu yksinkertaisesti	Kiertoputkisto suurelta osin kalorimetrin ulkopuolella
Helppo tyhjentää	Suunniteltu mittaamaan eri tyyppisiä polttoaineita (ylimääräistä vesitilaa)
	Avausmekanismin asennustarkkuus
	Läpivienneissä lämpösilta kuorien välissä
	Lämpötilaerot kuorien välissä aiheuttaa jännityksiä
	Polyuretaanieriste ei kestä säteilyä

#### 4.4 Rakennevaihtoehdot

Lähtötiedoissa on määritetty mittauksen vaiheet ja prosessikaavio, mutta ne eivät kuitenkaan ota kantaa kalorimetrin mekaaniseen toteutukseen. Toteutusta voidaan hahmotella SKB:n kalorimetrin pohjalta, missä jäähdytyspiiri on rakennettu kiertämään astian ulkopuolella. Yhteys pinnalle on järjestetty kiertopumpun molemmiin puolin, kalorimetrin ulkopuolisen mittauspiirin kohdalta. Kuvassa 27 on esitetty kalorimetrin mittauspiirin toiminta.

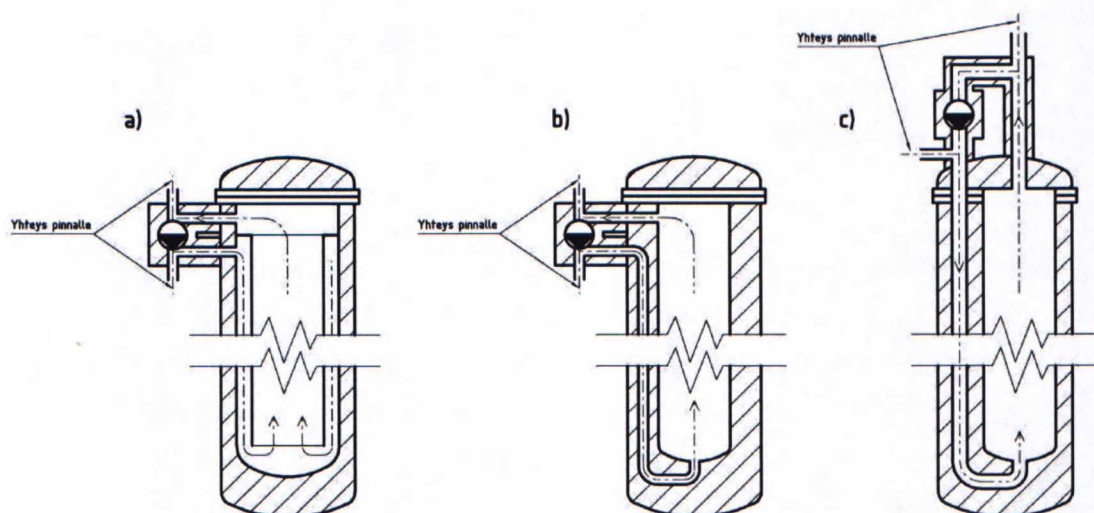
**Kuva 27. SKB:n kalorimetrin poikkileikkaus.**

Kalorimetrin ulkopuolisen putkiston eristäminen on hankalaa. Se vaatii kaksinkertaisen putkiston, missä molemmat ovat täysin vesitiiviitä. Tällöin putkiston kokoaminen ja tarkastaminen on vaikeaa. Toiseksi SKB:n mallissa sisempi mittauspiiri on jäykästi kiinnitetty ulompaan astiaan



ylä- ja alareunastaan. Tämä aiheuttaa jännityksen aina kun sisä- ja ulkokuoren välillä on lämpötilaero. Onkin syytä kehittää uusia toimintaperiaatteita, millä vältetään kalorimetrin ulkopuolinen putkisto ja kahdesta pisteestä jäykästi tuettu rakenne.

Uusien toimintaperiaatteiden kehittämisen perustana on käytetty muutamia hyväksi havaittuja ominaisuuksia: rakenne koostuu sisäkkäisistä säiliöistä, pumppu sijaitsee kalorimetrin ulkopuolella ja yhteydet pinnalle tehdään säiliön ulkopuolisen putkiston kohdalta. Ulkopuolisen putkiston minimoiminen tarkoittaa luopumista pohjassa sijaitsevasta läpiviennistä. Tällöin kiertoputkisto sijaitsee kuorien välisessä ilmatilassa. Nyt rakennemuotoilun vaihtoehtoiksi jää kiertoputkiston ja läpivientien paikan varioiminen. Kuvaan 28 on koottu vaihtoehtoisia rakennemuotoiluja.



**Kuva 28. Kalorimetrin rakennevaihtoehtojen poikkileikkaukset.**

Kuvan 28 vaihtoehdossa a) mittauspiirin jäähdytevirtaus ohjataan polttoainekammioon sylinterimäisen (ns. downcomer) ohjaimen avulla. Siinä mittauspiirin rakenne koostuu kahdesta sisäkkäisestä sylinteristä, joista sisempi on ulompaa lyhyempi. Jäähdytevirta ohjataan sylinterien välisen tilan yläosaan, mistä se virtaa alas ja palaa polttoainekammion kautta takaisin ylös ja pumpulle. Rakenteen etuna on paksu vesitila polttoaineen ympärillä, jolloin mittauspiiristä karkaava säteily jää pieneksi. Rakenteen haittana on lisääntynyt vesimassa, joka hidastaa lämpötilan muutosta ja monimutkainen rakenne. Lisäksi rakenteeseen voi muodostua taskuja, jotka estävät jäähdytteen sekoittumista ja keräävät ilmaa.

Vaihtoehdossa b) ohjain on korvattu putkella, joka ohjaa jäähdytteen polttoainekammion alaosan. Tällöin jäähdytevirtaus on yksiselitteinen ja putkiston ilmaus on helppoa. Rakenne sisältää läpiviennin kalorimetrin sivusta. Tämä on hankala toteuttaa, sillä kalorimetrin kokoonpano tapahtuu pituusakselin suuntaisesti. Siirtämällä kaikki läpiviennit kanteen voidaan kalorimetri

sisä- ja ulkokuori erottaa toisistaan huoltoa varten ilman, että mitään kiinteitä asennuksia tarvitsi purkaa.

Vaihtoehdossa c) jäähyteputkiston läpiviennit on kannessa. Käytännössä tämä tarkoittaa pum-  
pun kiinnittämistä kalorimetrin runkoon ja ulkopuolisen putkiston korvaamista letkulla. Kannen  
tiivistämisen kannalta tämän ei pitäisi tuottaa ongelmia, sillä avattava kansi on joka tapauksessa  
varustettava tiivisteillä. Ongelmaksi voi muodostua kalorimetrin kalibrointi, sillä kalibroi-  
ntielementin energian syöttö vaatii kaapeliyhteyden altaan reunalla oleviin laitteisiin. Esimerkiksi  
SKB:n kalorimetrin kalibrintielementti sisältää oman kannen, jota käytetään vain kalibrintien  
aikana.

4.4.1 Vaihtoehtojen arviointi

Neljän eri rakennevaihdon kehittäly eteenpäin ei ole järkevää, sillä tarvittavan työn määrä mo-  
ninkertaistuu. Onkin syytä vertailla mallien ominaisuuksia ja päättää niiden perusteella mitkä  
vaihtoehdot ovat jatkokehittelyn arvoisia.

Pistearviointi

Rakennevaihtoehtoja on vertailtu valmistettavuuden, käytön ja mittauksen onnistumisen pohjal-  
ta. Ominaisuuksien pisteytys tehdään suhteessa toisiin rakennemalleihin. Keskimääräistä tasoa  
edustaa arvosana 2. Keskitasoa heikommin pärjäävä saa arvosanan 1 ja paremmin 3. Ominai-  
suuksia on painotettu niiden tärkeyden perusteella. Vähiten painoarvoa on annettu valmistetta-  
vuudelle ja tarkastettavuudelle, sillä nämä ovat kertaluonteisia tapahtumia ja eivät suoranaisesti  
vaikuta mittaukseen. Näiden painotus on 0,05. Tärkein ominaisuus on lämpötiiveys, jonka pai-  
noarvo on 0,25. Ominaisuuksien arvositat kerrotaan painotuksella ja summataan yhteen. Koska  
painotuksen summa on 1, niin rakennevaihtoehtojen kokonaisarvosana vaihtelee arvojen 1...3  
välillä. Rakennevaihtoehtojen pistearviointi on taulukossa 3.

Taulukko 3. Rakennevaihtoehtojen pistearviointi.

Rakenne		a)	b)	c)	SKB
Ominaisuus					
Valmistettavuus	,05	1	2	3	1
Tarkastettavuus	,05	1	2	3	1
Huollettavuus	,15	2	2	3	2
puhdistettavuus	,20	1	1	1	3
Instrumentointi	,10	2	2	2	3
Lämpötiiveys	,25	3	3	3	2
Lämpöä sitova massa	,20	1	3	3	2
Kalibrointi	,20	2	2	1	2
Σ	1	2,15	2,65	2,7	2,6
Ominaisuuden arvostelu välillä [1,3], missä 3 on paras arvosana					



Valmistettavuuteen vaikuttaa kalorimetrin kokoonpanon työvaiheiden määrä, mutta ei valmistus. Rakenteet koostuvat lähes samoista komponenteista, joten valmistuksen osalta ei eroja juurikaan synny. Kaikista yksinkertaisin kokoonpanorakenne on vaihtoehdolla c), missä mittauspiiri voidaan asentaa yhdessä osassa ulomman kuoren sisään. Monimutkaisin rakenne on SKB:n kalorimetrissä, missä mittauspiirin kiertoputkisto lävistää ulomman kuoren niin sivusta kuin pohjasta.

Tarkastettavuudella tarkoitetaan mahdollisuutta tarkastaa hitsausliitokset valmistuksen yhteydessä ja jälkeen. Tarkastamalla voidaan todeta liitosten vedenpitävyys ja toteutuksen laadukkuus. Monimutkaiset ja hankalasti luoksepäästävät muodot laskevat tarkastettavuudesta saatavia pisteitä.

Käytettävyyteen lasketaan mukaan laitteen huolto, mittalaitteiden asennus ja laitteen puhdistettavuus. Polttoainekammion mittarit kannattanee asentaa sisemmän kuoren läpi siten, että johdotukset tulevat eristetilaan. Toinen vaihtoehto olisi asentaa anturit polttoainekammion yläosasta, mutta tämä vaatisi lisätilaa polttoaineen ja kuoren väliin. Mitta-anturit täytyy kalibroida aika-ajoin, jolloin ne joudutaan irrottamaan laitteesta. Helposti huollettavassa rakenteessa anturit ovat vaivattomasti tavoitettavissa ja vaihdettavissa. Helposti puhdistettava laite voidaan huuhdella painepesurilla ja pesuvedet valuvat suoraan ulos.

Mittausta edesauttavia ominaisuuksia ovat pieni vesitilavuus, lämpötiiveys, anturien sijoittelun helppous ja kalibrointi. Esimerkiksi vaihtoehto a) saa huonoimmat pisteet, koska downcomerin vesitilavuus on suuri ja se vaikeuttaa anturien asentamista polttoainekammioon. SKB:n kalorimetrin lämpötiiveys on huonoin, koska sen putkisto on muita vaihtoehtoja pitempi ja vaatii oman eristyksen. Vaihtoehdon c) kalibrointi on haastavinta, sillä kalibrointi vaatii johdotuksen pinnalle ja sen myötä oman erillisen kannen. Tämä johtaisi kalorimetrin nostamiseen pinnalle jokaisen kalibroinnin yhteydessä, jonka jälkeen ei voida olla varmoja kalibrointi- ja mittausta- pahtuman olosuhteiden vastaamisesta.

Arvostelun perusteella vaihtoehto a) voidaan karsia ulos jatkosta heikon tuloksen perusteella. Vastaavasti vaihtoehto c) voidaan pitää jatkossa vahvan tuloksen seurauksena. Jäljelle jääneistä vaihtoehdoista SKB:n malli edustaa testattua ja toimivaa rakennetta. Rakenne b) on yhdistelmä SKB:n ja c):n rakenteita, joten se ei tuo mitään uutta näihin kahteen rakenteeseen verrattuna. Jatkotarkasteluun valitaan siis vaihtoehdot c) ja SKB.

#### **4.4.2 Vaihtoehtojen jatkokehittely**

Ennen lopullisen mallin valitsemista jatkoon päässeiden vaihtoehtojen ominaisuuksia kannattaa kehittää paremmiksi. Edellä tehdystä taulukosta voidaan poimia rakenteiden heikkouksia, joiden parantamiseen tulee kiinnittää huomiota.

**SKB**

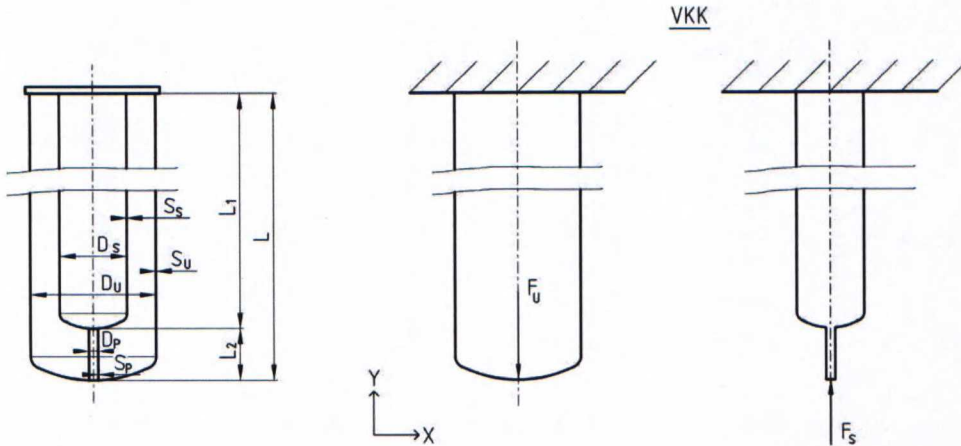
SKB:n kalorimetrin suurimmat heikkoudet ovat hankala kokoonpano ja astian ulkopuolella kiertävän putkiston eristäminen. Kalorimetrissä on läpiviennit mittauspiirin pohjassa ja yläosassa. Mittauksen aikana sisäästia lämpenee ulkokuoreen nähden, jolloin sisäosa pyrkii kasvamaan ulko-osaa enemmän. Koska rakenne estää vapaan lämpölaajenemisen, aiheutuu siitä jännityksiä. Pahimmassa tapauksessa astia rikkoutuu häiriötilanteen seurauksena.

Jännitystarkastelua varten täytyy arvioida rakenteen alustavia mittoja. Arviointiin tarvitaan sisä- ja ulkolieriön halkaisija ja seinämäpaksuus, pituusmitat ja pohjan läpivientiputken mitat. Määrittävät mitat tulevat polttoaineen ulkomitoista, joiden perusteella sisäsäiliö mitoitetaan. Sisä- ja ulkolieriön väliin jäävä ilmatila määräytyy tarvittavan eristepaksuuden ja mittalaitteiden koon mukaan. Kalorimetrin pohjassa oleva läpivientiputki arvioidaan eristetilan paksuuden mittaiseksi.

Polttoainenippu on paksuimmasta kohdasta kuusikulmainen, samansuuntaisten sivujen välin ollessa 144 millimetriä. Pienin halkaisija mistä kuusikulmainen muoto mahtuu läpi, on noin 170 millimetriä. Tämän perusteella sisähalkaisijaksi voidaan valita 180 millimetriä, sillä polttoaineen ohjaimille ja mittauslaitteille on varattava tilaa sen sisältä. Polttoainenipun pituus on noin 3,2 metriä, jolloin sisäästian tarvittava pituus on 3,3 metriä. SKB:n kalorimetrin eristetilan paksuus on noin 60 millimetriä, jonka perusteella ulkohalkaisijaksi tulee 300 millimetriä. Läpivientiputken halkaisijaksi oletetaan 30 millimetriä. Kaikkein seinämien paksuudeksi oletetaan 3 millimetriä. Osien materiaalia on ruostumaton teräs.

Tarkastelu aloitetaan piirtämällä tilanteesta kuva, missä näkyy tarvittavat mitat. Tämän perusteella voidaan piirtää kuvan 29 mukainen vapaakappalekuva, jossa on rakenteeseen vaikuttavat voimat. Lähtötilanteessa rakenne oletetaan jännityksettömäksi.





**Kuva 29. Kalorimetrin mitat ja voimat.**

Rakenne koostuu kahdesta eri paksuisesta sisäputkesta ja yhdestä ulkoputkesta. Päätyjen vaikutusta ei huomioida. Koska kappale on tasapainossa, täytyy sisä- ja ulkokuoreen vaikuttavien voimien osoittaa erisuuntiin ja olla yhtä suuria. Jotta kalorimetri pysyy eheänä, sisä- ja ulkokuorien pituuden muutosten täytyy olla samansuuntaisia ja yhtä suuria. Näillä olettamilla voidaan laskea rakenteeseen vaikuttavat jännitykset.

Sisäputkien lämpötila voi nousta ulkokuoreen nähden, jolloin niiden pituus pyrkii muuttumaan suhteessa lämpötilaeroon. Lämpölaajenemisen suuruus on

$$\Delta L_{\text{lämpö}} = \alpha L \Delta T, \quad (8)$$

missä  $\alpha$  on pituuden lämpötilakerroin,  $L$  on rakenteen alkuperäinen pituus ja  $\Delta T$  on alku- ja lopputilanteen välinen lämpötilaero (Valtanen 2010, 225). Koska laajeneminen ei tapahdu vapaasti, rakenteen sisälle syntyy jännitystilaa. Jännitys voidaan kuvata voimana  $F$ , jolloin pituuden muutos voidaan kirjoittaa

$$\Delta L_{\text{pakotettu}} = -\frac{FL}{EA}, \quad (9)$$

jossa  $F$  on kappaleen sisäinen voima,  $E$  on materiaalin kimmokerroin ja  $A$  on laajenemista kohtisuoraan oleva pinta-ala (Valtanen 2010, 493). Sisemmän kappaleen pituuden muutokseen vaikuttaa siis lämpölaajeneminen ja pakotettu muodonmuutos. Tämä voidaan kirjoittaa

$$\Delta L_s = \Delta L_{\text{lämpö}} + \Delta L_{\text{pakotettu}} \quad (10)$$

Koska lämpölaajenemiseen ei vaikuta kappaleen pinta-ala, voidaan tämä kirjoittaa yhdellä lausekkeella sisälieriön osalta. Pakotetun muodonmuutoksen suuruuteen vaikuttaa rakenteen jäyk-

kyys, jolloin molempien sisäputkien vaikutus täytyy huomioida erikseen. Nyt sisäosan pituuden muutos voidaan kirjoittaa muotoon

$$\Delta L_S = \alpha L \Delta T - \frac{F_S}{E} \left( \frac{L_1}{A_S} + \frac{L_2}{A_P} \right). \quad (11)$$

Vastaavasti ulkokuoren pituuden muutos voidaan kirjoittaa

$$\Delta L_U = \frac{F_U L}{EA_U}, \quad (12)$$

sillä ulkokuoren oletetaan pysyvän vakio- lämpötilassa. Alkuehtojen mukaan ulko- ja sisäkuoren pituuden muutokset ovat yhtä suuria, joten

$$\Delta L_S = \Delta L_U \quad (13)$$

Nyt kaava voidaan kirjoittaa muotoon

$$\alpha L \Delta T - \frac{F_U}{E} \left( \frac{L_1}{A_S} + \frac{L_2}{A_P} \right) = \frac{F_U L}{EA_U}, \quad (14)$$

kun muistetaan että voimat  $F_S$  ja  $F_U$  ovat yhtäsuuria.

Yhtälöstä voidaan ratkaista sisäinen voima  $F_U$

$$F_U = \alpha L \Delta T E \left[ \frac{L}{A_U} + \frac{L_1}{A_S} + \frac{L_2}{A_P} \right]^{-1} \quad (15)$$

Sisäisen voiman avulla voidaan ratkaista rakenteen eri kohdissa vaikuttavat jännitykset yhtälön

$$\sigma = \frac{F_U}{A}, \quad (16)$$

avulla. Painelaitteiden suunnittelustandardissa SFS-EN 13445-3 ruostumattoman teräksen varmuusluku on 1,5, kun käytetään 1,0 % venymisrajaa. Ruostumattomasta teräksestä 1.4301 valmistetulle painelaiteputkelle annetaan 1,0 % venymisrajaksi 191 MPa, kun lämpötila on 100 °C (SFS-EN 10217-7, 38). Jakamalla tämä varmuusluvulla, sallituksi jännitykseksi saadaan 127 MPa. Rakenteiden jännityksien yhteenveto on taulukossa 4.

**Taulukko 4. Rakenteen jännitykset.**

Osa	Jännitys [MPa]	Sallittu [ < 127 MPa]
Ulkokuori	56	OK
Sisäkuori	93	OK
Tyhjennysputki	436	EI



Tulosten perusteella tyhjennysputken jännitys ylittää sallitun arvon. Koska sallitun jännityksen ylitys on suuri, putken koko tulisi kasvattaa moninkertaiseksi kestäminen varmistamiseksi. Tämä puolestaan lisäisi sisäkuoren jännitystä.

Mikäli rakenteen kestävyys haluttaisiin varmistaa kasvattamalla materiaaalipaksuuksia, tulisi sisäosalle tehdä nurjahdustarkastelu. Nurjahdus voi esiintyä hoikilla ja pitkillä kappaleilla, jotka ovat puristusjännityksen alaisia. Nurjahdukseen vaadittava voima on huomattavasti pienempi kuin mitä jännityksien perusteella voisi sallia.

Kalorimetrin ulkopuolisen putkiston eristäminen on haastavaa, sillä käytännössä astioiden välisen tilan tulisi jatkua avoimena koko mittauspiirin ympäri. Tämä lisää mahdollisten vuoto- paikkojen määrää ja riskiä huomattavasti, sillä vuoto pääsee leviämään koko kalorimetrin eriste- tilaan. Tämän lisäksi rakenteesta on hankala tehdä "modulaarista", missä eri rakenneyhdykset on koottu kokoonpantaviin ryhmiin.

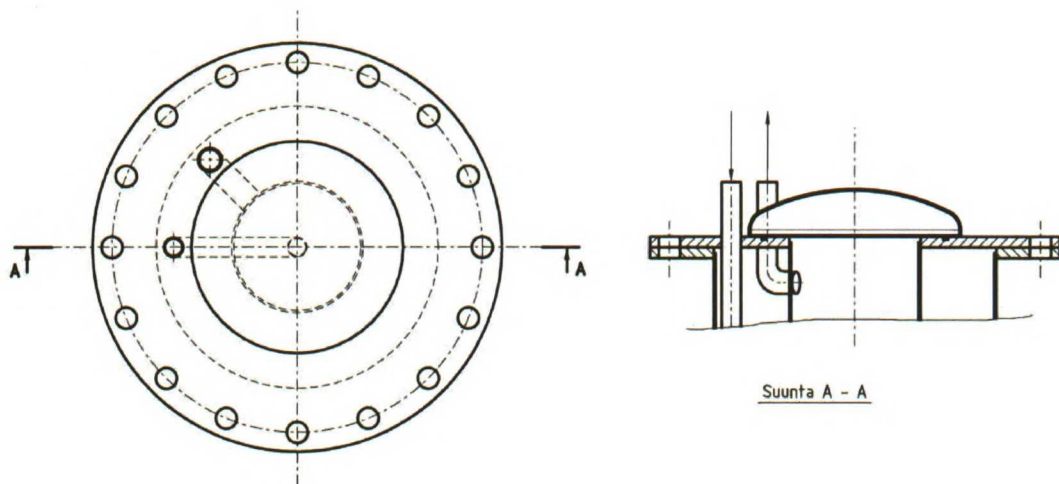
Koska rakenteen monimutkaisuus näyttää nousevan merkittäväksi ongelmaksi, on perusteltua hylätä tämä vaihtoehto ja keskittyä muiden mallien kehittämiseen.

### **Vaihtoehto c)**

Vaihtoehdon c) suurimmat heikkoudet ovat tyhjennysyhteen puuttuminen ja kalibroinnin haasteellisuus. Otetaan ensin tarkasteluun kalibroinnin ongelmat.

### **Kannen läpivienti**

C)-vaihtoehdossa avattava kansi peittää koko kalorimetrin yläosan. Tämä ei kuitenkaan ole välttämätöntä, sillä kannen tarkoitus on mahdollistaa polttoaineen siirrot. Polttoainekammion koko on pienempi kuin astian ulkohalkaisija, sillä osa putkistosta kiertää astioiden välisessä eristeti- lassa. Pienentämällä kannen koko vastaamaan polttoainekammion halkaisijaa osa kalorimetrin yläpinnasta jää vapaaksi. Mittauspiirin putkisto voidaan vetää tämän osan kautta, jolloin kansi ei ole yhteydessä veden kierrättämiseen. Periaatteellinen kuvaus kierrätysputkiston sijainnista pienemmän kannen tapauksessa on kuvassa 30.



**Kuva 30. Kannen läpivienti.**

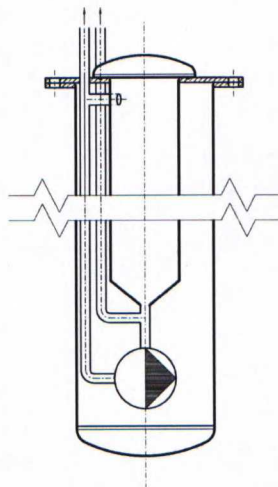
Yllä olevasta kuvasta näkee sisemmän ja ulomman kuoren välisen kiinnityksen. Se voidaan tehdä laippaliitoksena, missä samankokoiset laipat on hitsattu kiinni molempiin kuoriin. Kokoonpanossa rakenteet voidaan yhdistää nopeasti pulttiliitoksella. Kannen tiivistäminen voidaan tehdä esimerkiksi O-renkaalla, joka sijoitetaan ylemmässä laipassa olevaan uraan.

Kannen halkaisijan pienentämisellä on vaikutus lämmön siirtymiseen, sillä ympäröivä allasvesi pääsee vaikuttamaan laajemmin kalorimetrin laippapintaan. Tämän vaikutusta vähentää kuitenkin se, että kannen koosta riippumatta allasveden vaikutus täytyy ajatella tiivisteyteen saakka.

Rakenteen ongelmana on lämpöhäviön määrittäminen. Eteenkin kiertoputkiston läpivienti vaikuttaa suurelta lämpösillalta, sillä mittauspiirin ja altaan vettä erottaa vain ohut metalliseinä. Mittauspiiristä täytyy olla yhteys altaan reunalla olevaan laitteistoon, joten läpiviennit ovat välttämättömät.

Sijoittamalla kiertopiirin pumppu kalorimetrin eristetilaan voidaan läpiviennin kautta kulkevan massavirran suuruus minimoida mittauksen aikana. Tämä myös helpottaa järjestelmästä karkaan lämpötehon arviointia, sillä yhteys mittauspiiriin ja altaan välillä on minimaalista. Lisäksi pumpun teho siirtyy suurelta osin mittauspiiriin. Rakenne on hahmoteltu kuvaan 31.





**Kuva 31. Kiertopiirin ja pumpun sijoittelu.**

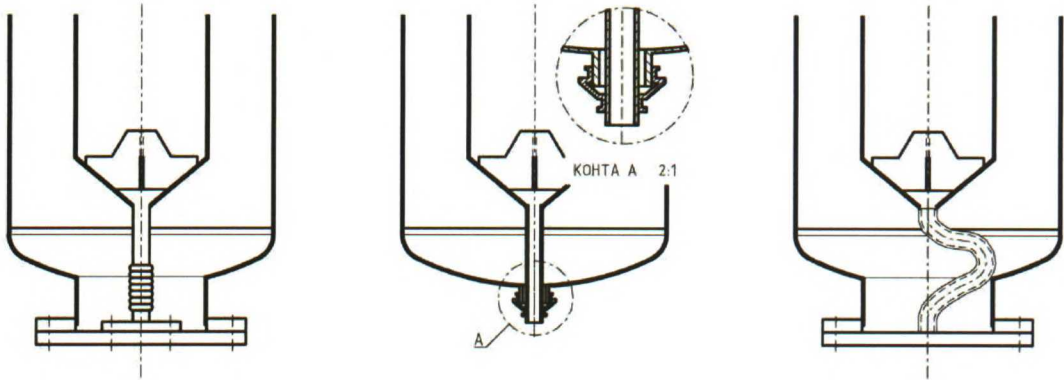
Pumpun tarvitsema lisätila kasvattaa rakenteen korkeutta. Kalorimetrin maksimikorkeus on 4 m ja sisäosan 3,3 m, jolloin polttoaineen alapuolelle jää tilaa 0,7 m. Tämä tila riittänee pumpulle ja varusteille, mutta lopullisessa rakennemuotoilussa täytyy huomioida korkeuden yläraja.

### **Pohjan läpivienti**

Kalorimerin pohjassa oleva tyhjennyslinja helpottaa laitteen operointia. Yhteen kautta kalorimetri on nopea täyttää ja tyhjentää vedellä altaasta siirtojen yhteydessä. Lisäksi kalorimetrin puhdistus voidaan tehdä huuhtelemalla, jolloin pesuvesi valuu tyhjennysyhteen kautta ulos.

Läpiviennin ongelmana on rakenteiden välinen epäkeskisyys ja liike. Oletetaan esimerkiksi tilanne missä sisemmän astian pohjaan on hitsattu jäykkä putki, jonka täytyy mennä läpi ulomassa kuoressa olevasta reiästä. Vaikka astioiden geometria määritellään tarkasti suunnitelmassa ja astia valmistetaan suunnitelmien mukaan, niin toleranssit mahdollistavat sisä- ja ulkokuoren välisen säteisheiton. Lisäksi suunnitteluperusteissa oleva 50 °C lämpötilaero kuorien välissä tarkoittaa noin 3 mm lämpölaajenemista aksiaalissuuntaan.

Kuten on jo aiemmin laskettu, jäykkä putkiyhteys sisä- ja ulkokuoren välissä aiheuttaa osiin suuria jännityksiä. Lisäksi tällainen kiinteä asennus on hankala toteuttaa ja se haittaa laitteen purkamista. Onkin syytä katsoa vaihtoehtoja, joilla tyhjennyslinjasta saadaan valmistettua joustava. Vaatimuksia läpiviennille ovat vesitiiveys, vähintään 3 mm liikevara ja säteilyn kestävyys. Ideoinnin perusteella syntyi kolme mahdollista rakennevaihtoehtoa, jotka esitetään kuvassa 32.



**Kuva 32. Tyhjennyslinjan toimintaperiaate.**

Ensimmäisessä vaihtoehdossa liikevara on toteutettu paljetasaimen avulla. Paljetasaimia käytetään yleisesti putkiston lämpöliikkeiden kompensoimiseen ja niitä valmistetaan useista eri materiaaleista, muun muassa ruostumattomasta teräksestä. Rakenteen haittana on palkeen suuri pituus, uusi sisä- ja ulkosäiliön välinen mittariippuvuus ja palkeen kiinnittäminen tiiviisti pohjalaippaan (Prospero 2010, 26).

Keskimmäisessä vaihtoehdossa tyhjennysputki kulkee ulkokuoressa olevan holkin läpi. Koska holkin ja putken samankeskeisyydestä ei voida olla varmoja, niin siinä ei voi käyttää perinteisiä akselintiivistyskomponentteja. Tiivisteksi voisi soveltua suojakumi, joka kiristetään tiiviisti holkkia ja putkea vasten. Menetelmän haittana on, että suojakumeja ei valmisteta tähän tarkoitukseen. Lisäksi säteily haurastuttaa kumia, johtaen lopulta vuotoon.

Viimeisessä vaihtoehdossa poistolinjassa on käytetty putken sijasta letkua. Letkuna voidaan käyttää metalliletkua, joka kiinnitetään mittauspiirin ja pohjalaipan väliin. Letku on helppo vetää vapaasta tilasta, sillä kalorimetrin eristetilaan sijoitettu pumppu vie tilaa suoraan sisäsäiliön alapuolelta. Mitoittamalla letku riittävän pitkäksi, on se helppo kiinnittää irtolaippaan kalorimetrin kokoamisen yhteydessä.

Palkeiden ja letkujen käyttämistä turvallisuusluokitellussa järjestelmässä tulee välttää, sillä niiden mekaaninen kestävyys on huomattavasti muuta putkistoa heikompaa. Sijoittamalla sulkuventtiili letkun ja mittauspiirin väliin, voidaan letkun turvallisuusluokka alentaa luokasta 3 luokkaan EYT

Viimeinen vaihtoehto täyttää parhaiten läpiviennille asetetut kolme ehtoa, vesitiiveys, 3 mm liikevara ja säteilynkestävyys. Letkullinen vaihtoehto antaa myös parhaat edellytykset rakenne-  
muotoilulle, kun huomioidaan pumpun ja venttiilin vaatimat tilatarpeet.



## Rakenteen valinta

Kahden lupaavimman rakenteen jatkokehittämisellä jälkeen vaihtoehto c) näyttää parhaimmalta vaihtoehdolta. Rakenteessa olleisiin heikkouksiin on löytynyt parannukset, jolloin sen pahimmat heikkoudet on korjattu. Tuotekehityksen seuraavassa vaiheessa tutkitaan kalorimetrissä esiintyviä ilmiöitä, joiden perusteella rakenteen mitat voidaan optimoida.

## 4.5 Mitoitusperiaatteet

Mitattavat lämpötehot ovat pieniä verrattuna järjestelmän kokoon. Lisäksi mittauksiin käytettävä aika on niukka. Tällöin kaikki lämpöä sitovat massat ja lämpövuot mittausspiiristä ympäristöön heikentävät mittauksen suorittamista. Laitteiston mekaanisen suunnittelun periaatteina voidaankin pitää massan ja lämpöhäviöiden minimoiminen. Pitämällä massat pieninä, saadaan lämpenemistä hidastava ominaislämpökapasiteetti pieneksi ja muutokset helpommin havaittaviksi. Tätä tavoitetta edesauttavat pienet lämpöhäviöt. Toinen yhtä tärkeä asia on rakenteen tiiveys, sillä vuodot mittausspiiristä altaaseen vääristävät tuloksia.

Kalorimetri koostuu kahdesta sisäkkäisestä lieriöstä. Sisimmäisen astian mitoitus riippuu poltto-ainenipun mitoista, jolloin sisälieriö on kalorimetrin mitoitusta määräävässä asemassa. Ulko-kuoren mitoituksessa on huomioitava komponenttien tilantarve ja vaikutus lämpöhäviöihin. Tässä työssä mitoitus tehdään lämpöhäviöiden optimoinnin kautta ja jättämällä rakenteeseen tilaa komponenttien sijoittelua varten.

Sopivien päämittojen löydyttyä voidaan tehdä alustava lujuusanalyysi karkeita arvioita käyttäen. Tätä varten on valittava rakenteessa käytettävät materiaalit ja mitat. Valintoja tehdessä tulee olla yhteydessä materiaalin toimittajiin, jotta kyseisen aineksen saatavuudesta voidaan olla varmoja. Tässä työssä on astian lisäksi tarkasteltu myös kalorimetrin sisäisen putkiston mitoitusperiaatteita.

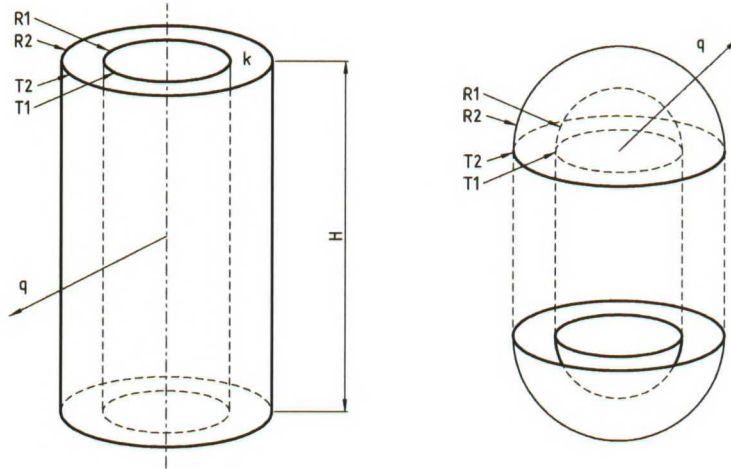
### 4.5.1 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtyminen voi tapahtua konvektion, johtumisen tai säteilyn kautta. Näistä konvektio ja johtuminen ovat toisensa poissulkevia, joten vain toinen mekanismeista voi esiintyä kerrallaan. Johtumista esiintyy kiinteissä aineissa ja seisovissa fluideissa. Konvektion voimakkuus riippuu kappaleiden geometriasta, lämpötilaerosta ja väliaineen viskositeetista. Säteilyn suuruuteen vaikuttaa kappaleen pinta-ala, lämpötila ja säteilykerroin.

### Johtuminen

Aluksi tarkastellaan lämmön siirtymistä kahden lieriön välillä, joiden päät ovat pallopintaisia (kuva 33). Pienempi sylinteri kuvaa kalorimetrin sisäsäiliötä ja suurempi kalorimetrin ulkopintaa. Sylinterien välissä on suljettu ilmatila. Sylinterien pintojen oletetaan olevan ympäröivän

veden lämpötilassa, koska lämmön siirtyminen vedestä metalliin on paljon suurempaa kuin metallista ilmaan. Teräslieriöiden eristevaikutusta ei ole huomioitu tarkastelussa. Säiliön ulkopuolisen altaan lämpötilan  $T_2$  oletetaan olevan koko ajan  $+ 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja mittauspiirin lämpötilan  $T_1$  olevan  $+ 51\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kalorimetrin sisäosan halkaisijaksi oletetaan 180 mm ja ulkohalkaisijan vaihdella 181...580 mm välissä.



**Kuva 33. Kalorimetrin lämpövuoto ja päämitat.**

Johtumalla siirtyvä lämpö lasketaan kahdessa osassa. Lieriömäisen osan lämmön siirtyminen voidaan laskea kaavalla

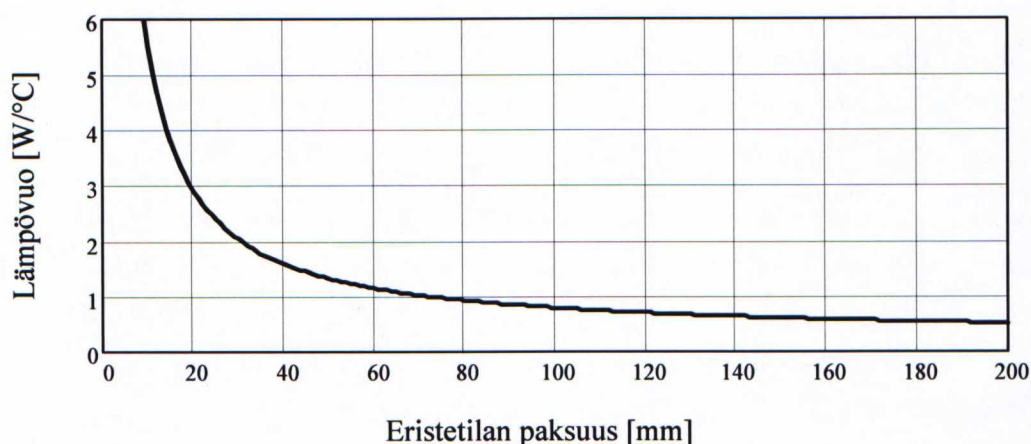
$$q_{\text{joht, syl}} = \frac{2\pi k H (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (17)$$

ja pallomaisista päädyistä siirtyvä lämpö kaavalla

$$q_{\text{joht, pääty}} = \frac{4\pi k (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}, \quad (18)$$

missä  $k$  on ilman lämmönsiirtokerroin,  $H$  on sylinterin korkeus,  $T_1$  on sisälämpötila,  $T_2$  on ulkolämpötila,  $r_1$  on sisähalkaisija ja  $r_2$  on ulkohalkaisija (Bejan & Kraus 2003, 181 - 182). Lämmön johtuminen eristetilan paksuuden funktiona saadaan sijoittamalla kaavaan ilman lämmönjohtavuuskertoimen  $k = 0,026\text{ W/(mK)}$ , sisälieriön säde  $r_1 = 90\text{ mm}$  ja ulkolieriön säde  $r_2 = 90...290\text{ mm}$ . Kuvassa 34 on lämmön johtumisen suuruus eristetilan paksuuden funktiona.



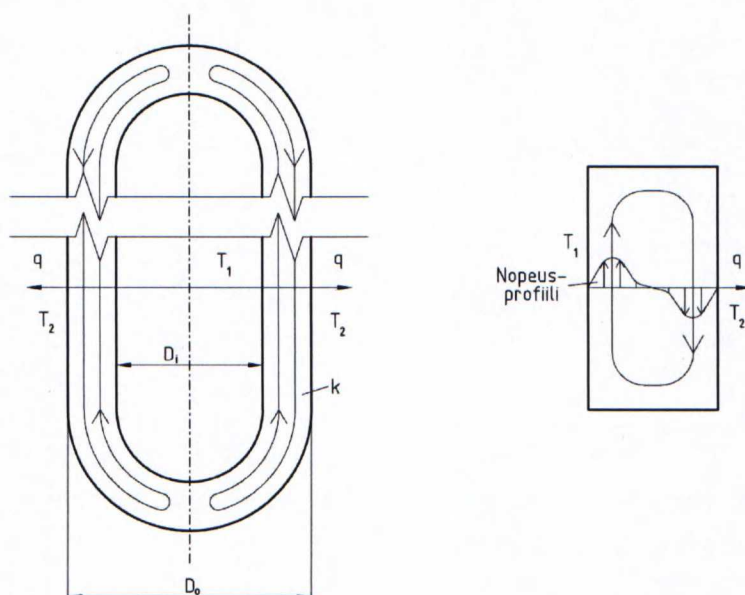


**Kuva 34. Lämmön johtuminen.**

Kuten kuvasta 34 nähdään, lämpövuoto ohuen ilmatilan läpi on hyvin voimakasta. Vuo alkaa tasaantua ilmatiljan paksuuden ollessa 60 mm. Karkaava energia on tällöin noin 1,2 W/°C. Eristetilan paksuuden ollessa 200 mm karkaavan energian suuruus on noin 0,5 W/°C.

### Konvektio

Konvektio syntyy väliaineen lämpötilaerojen seurauksena. Lämmennyt ilma laajenee jolloin sen tiheys on kylmää ilmaa pienempi ja se kohoaa kylmän ilman yläpuolelle. Jäähdyessään ilma painuu alas ja aloittaa kierron alusta. Kalorimetrin eristetilassa ilma lämpenee sisemmän astian vieressä ja nousee lämmintä pintaa pitkin ylös. Yläosassa ilma kohtaa kylmän ulkopinnan ja palaa ulkopintaa pitkin kalorimetrin alaosaan. Kuvassa 35 on esitetty kalorimetrin eristetilan konvektion suunta ja arvio nopeusjakaumasta.



**Kuva 35. Kalorimetrin eristetilassa esiintyvä konvektio.**

Konvektion voimakkuus on riippuvainen kylmän ja kuuman pinnan välisestä etäisyydestä. Eteenkin suljetussa tilassa vastakkaiset virtaukset voivat häiritä toisiaan, kuten kuvassa 35 olevasta väliaineen virtausnopeusprofiilista voidaan huomata. Mitä enemmän tilaa aineella on liikua, sitä helpommin konvektio syntyy.

Konvektiolla siirtyvän lämmön määrää kuvataan vertaamalla sen suuruutta johtumalla siirtyvään lämpöön. Suhdelukuna käytetään termiä  $k_{\text{eff}}$ . Suhdeluvun määrittelyyn vaikuttaa tutkittavan kappaleen geometria, väliaineen ominaisuudet ja lämpötilaero (Çengel 2006, 503 - 544). Lukua voidaan pitää vain suuntaa antavana, sillä kaavat pitävät sisällään yleistyksiä ja ne ovat voimakkaasti riippuvaisia kappaleiden geometriasta. Geometriset korjauskertoimet perustuvat kokeellisiin mittauksiin ja niitä on tehty vain yleisimmille muodoille. Koska kalorimetrin eristetilaa vastaavaa geometristä kerrointa ei ole määritetty, on se yksinkertaistettu suljetuksi, suorakulmaiseksi tilaksi. Tämä ei täysin vastaa tutkittavaa tilannetta, mutta antaa arvion konvektion voimakkuudesta.

Nosteen ja väliaineen kitkan vaikutusta arvioidaan Grashofin kertoimella  $Gr_L$ . Kerroin lasketaan kaavalla

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_1 - T_2)L_c^3}{\nu^2}, \quad (19)$$

missä  $g$  on putoamiskiihtyvyys,  $\beta$  on väliaineen lämpötilariippuvainen laajenemiskerroin,  $L_c$  on eristetilän leveys ja  $\nu$  on väliaineen kinemaattinen viskositeetti. Laajenemiskerroin  $\beta$  määritetään ideaalikaasuille kaavalla  $\beta = 1/T$ , missä  $T$  on absoluuttinen lämpötila.  $L_c$  voidaan laskea kaavalla  $L_c = (D_o - D_i)/2$ , missä  $D_o$  on kalorimetrin ulko- ja  $D_i$  sisähalkaisija. Grashofin kertoimessa jakajan yläpuoli kuvaa nosteen suuruutta ja alapuoli väliaineen kitkan jarruttavaa vaikutusta.

Rayleighin kerroin  $Ra_L$  määritetään kaavalla

$$Ra_L = Gr_L Pr, \quad (20)$$

missä  $Pr$  on Prandtin numero. Kerroin kuvaa väliaineen kitkan ja johtavuuden suhdetta ja se voidaan katsoa taulukosta. Esimerkiksi 50 °C ilman tapauksessa arvo on 0,7228. (Çengel 2006, 860).

Tämän jälkeen etsitään tilanteeseen sopiva kaava korkeuden ja leveyden, Prandtin numeron ja Rayleighin kertoimen avulla. Tapaukseen parhaiten soveltuu MacGregorin ja Emeryn kehittämä kaava. Nusseltin luku voidaan laskea kaavalla

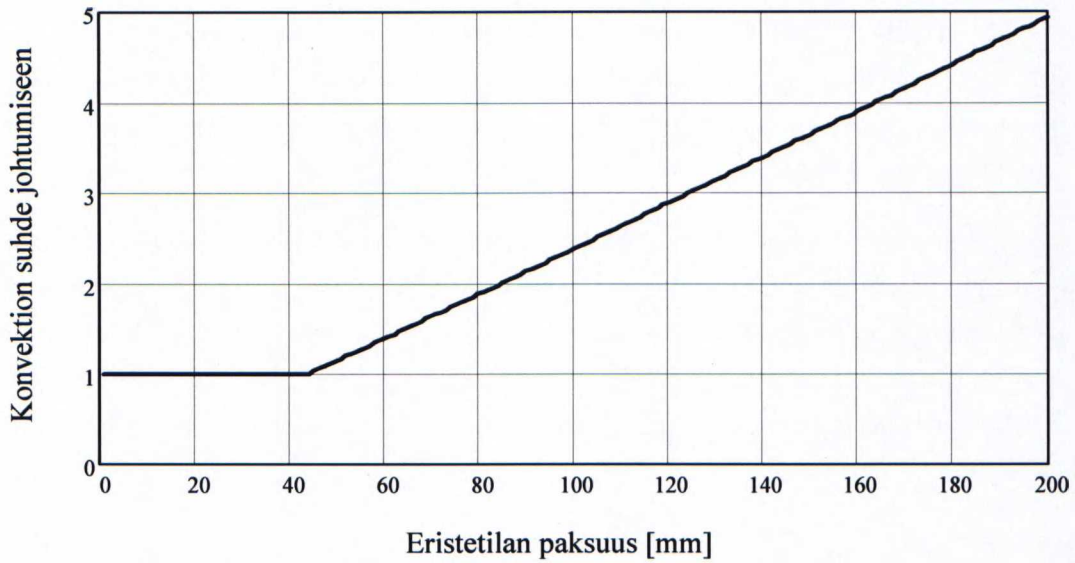


$$Nu = \max \left[ 0,42 Ra_L^{1/4} Pr^{0.012} \left( \frac{H}{L_c} \right)^{-0.3}, 1 \right], \quad (21)$$

missä  $H$  on kalorimetrin korkeus. Nusseltin luku kuvaa konvektion lämpöä siirtävää vaikutusta. Konvektion voimakkuuden suhdeluku  $k_{eff}$  saadan kaavalla

$$k_{eff} = kNu, \quad (22)$$

missä  $k$  on väliaineen lämmönjohtavuus. Laskemalla konvektion suuruus ilmatilan paksuuden funktiona saadaan kuvan 36 mukainen kuvaaja.

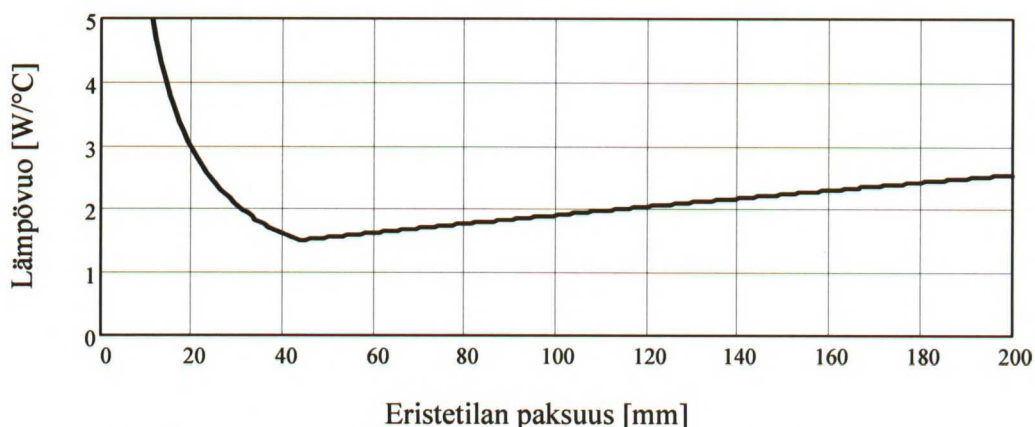


**Kuva 36. Konvektion voimakkuus suhteessa eristetilan paksuuteen.**

Konvektio ei voi olla koskaan arvoa yksi pienempää, sillä tällöin lämpö siirtyisi kylmästä lämpimään. Suhteen ollessa pienempi kuin yksi on lämmön siirtyminen vain johtumista. Tulosten perusteella konvektiota alkaa esiintymä ilmatilan ollessa suurempi kuin 45 mm ja sen merkitys kasvaa lähes lineaarisesti eristetilan kasvaessa. Yhdistämällä konvektion vaikutus  $k_{eff}$  johtumalla siirtyvän lämmön kaavaan, voidaan laskea konvektiokorjattu lämmön siirtyminen.

$$q_{konv} = \frac{2\pi k_{eff} H (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \frac{4\pi k_{eff} (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (23)$$

Kaavalla laskettu lämpövuoto eristetilan paksuuden funktiona näkyy kuvassa 37.



**Kuva 37. Lämmön siirtyminen johtumisen ja konvektion välityksellä.**

Tuloksista nähdään, että lämpövuoto mittauspieristä altaaseen on 1,5...3 W/°C. Johtumalla siirtyvä lämpö pienenee voimakkaasti eristetilan paksuuden kasvaessa, mutta voimistunut konvektio minimoi kyseisen hyödyn.

Koska konvektion suuruuden määrittäminen riippuu paljon kokeellisesti määritetyistä kertoimista, tuloksia ei voida pitää täysin tarkkoina. Numeerista tulosta tärkeämpänä huomiona voidaan pitää sitä, että laitteen eristetilassa esiintyy konvektiota. Konvektio lisää lämpöhäviötä, joten sen vaikutus kannattaa minimoida. Tämä voidaan tehdä pienentämällä vapaan ilmatilan määrää ja tekemällä pintojen välinen lämpötilaero pieneksi. Tähän tarkoitukseen sopii esimerkiksi sisäastian ympärille kierretty eristematto.

### Lämpösäteily

Säteilemällä siirtyvän lämmön suuruutta kuvaa Stefan-Boltzmannin laki,

$$q_{\text{sät}} = \sigma T^4 \quad (24)$$

missä  $\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio ja  $T$  on säteilevän kappaleen lämpötila. Jokainen kappale siis lähettää lämpösäteilyä absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Laki kuvaa täysin mustan kappaleen säteilyä, joka on täydellinen säteilijä. Eri materiaalien lähettämien säteilyjen voimakkuuksilla on eroja, joita kuvataan emissiivisyyskertoimella  $\varepsilon$ . Kertoimen arvot vaihtelevat välillä 1...0. Täysin mustalla esineellä kerroin on 1. Esimerkiksi ruostumattomalla teräksellä se vaihtelee välillä 0,1...0,7 (Mills 2002, 132). Saundersin mukaan ruostumattoman teräksen kevyesti hapettuneen pinnan emissiivisyyskertoimen voidaan käyttää arvoa 0,33 (Saunders 2007, 7). Teräksen emissiivisyyteen vaikuttaa pinnan puhtaus, karheus ja hapettuminen.

Lämpösäteilyn tehoa määritellessä huomioidaan pintojen välinen lämpötilaero, sillä myös kylmempi ulkopinta lähettää lämpösäteilyä. Tämän lisäksi säteilyn määrään vaikuttaa säteilevä pinta-ala ja emissiivisyys. Säteilystehon kaavaksi saadaan



$$q_{sat} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4), \quad (25)$$

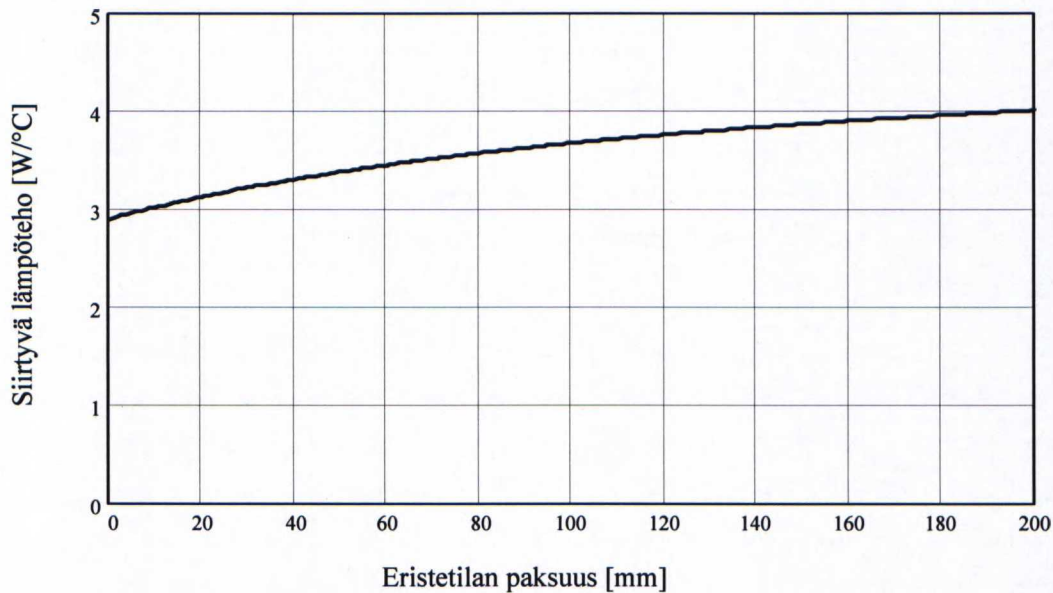
missä  $\varepsilon$  on emissiivisyyskerroin,  $\sigma$  on Stefan-Boltzmanin vakio,  $A$  on säteilevän kappaleen pinta-ala,  $T_1$  on säteilevän kappaleen lämpötila ja  $T_2$  on ympäristön lämpötila. Todellisuudessa osa säteilystä jää kimpoilemaan sisä- ja ulkolierion väliin, jolloin osa tehosta palaa takaisin. Çengel mukaan heijastavan pinnan vaikutusta voidaan kuvata pintaresistanssilla  $R_i$ , joka on sisäkkäisten sylintereiden tapauksessa

$$R_i = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right), \quad (26)$$

missä  $\varepsilon_1$  on lähettävän pinnan emissiivisyyskerroin,  $\varepsilon_2$  on vastaanottavan pinnan emissiivisyys,  $r_1$  on sisäsylinterin säde ja  $r_2$  ulkosylinterin säde (Çengel 2006, 732). Nyt säteilytehon kaava voidaan kirjoittaa muotoon

$$q_{sat} = \frac{\sigma A (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)}. \quad (27)$$

Säteilyn voimakkuuteen vaikuttaa lisäksi kulmakerroin, joka kuvaa säteilylähteen ja vastaanottavan pinnan välistä geometriaa. Sisäkkäisten säiliöiden tapauksessa se on yksi, sillä sisemmän säiliön lähettämä säteily kohtaa ulkosäiliön joka suunnalta. Säteilytehon suuruus eristetilän paksuuden funktiona on kuvassa 38.



**Kuva 38. Lämmön siirtyminen säteilemällä.**

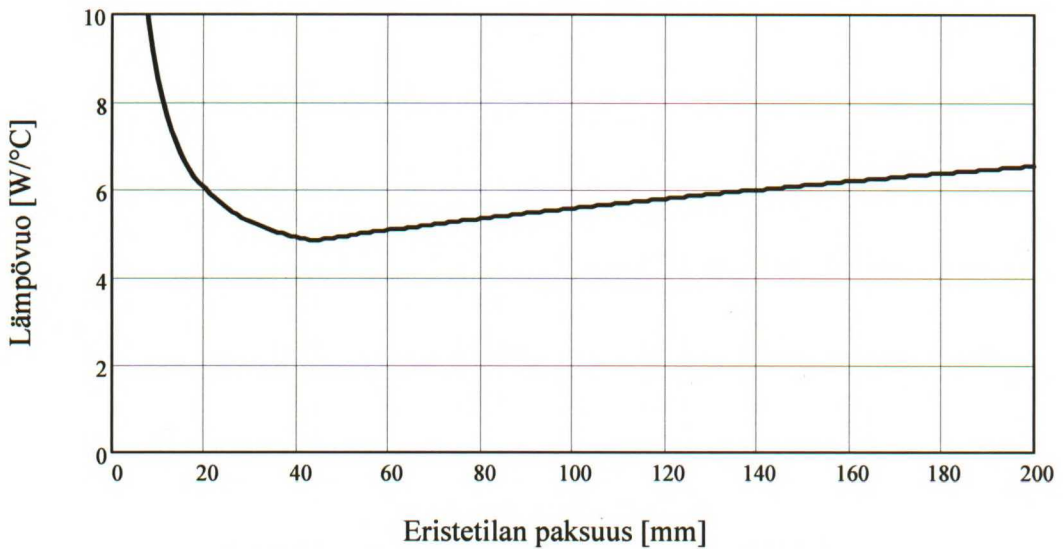
Säteilemällä siirtyvä lämpöteho on noin 3...4 W alle 200 millimetrin eristetilan paksuudella. Nyt voidaan arvioida konvektion ja säteilyn yhteisvaikutusta.

### Kokonaislämpöhäviö

Kalorimetrin mitoituksen perustaksi kannattaa laskea kaikki lämpöhäviöt yhteen ja valita sen perusteella sopiva eristetilan paksuus. Lämpövuoto voidaan laskea kaavalla

$$q_{\text{kok}} = q_{\text{konv}} + q_{\text{sät}} = \frac{2\pi k_{\text{eff}} H (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \frac{4\pi k_{\text{eff}} (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} + \frac{\sigma A (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (28)$$

Lämpövuon suuruus on esitetty kuvassa 39.



**Kuva 39. Kalorimetrin lämpövuoto eristetilan läpi.**

Lämpövuon suuruus vaihtelee noin 5... 7 W/°C välissä eristetilan paksuudesta riippuen. Tämä ei ohjaa eristetilan paksuutta mihinkään tiettyyn mittaan, joten se voidaan valita muihin perusteisiin vedoten. Eristetilaan tulee mittalaitteistoa ja mahdollisesti lisäeristeitä, jolloin vapaata tilaa tarvitaan.

Kalorimetrin alustavaksi ulkohalkaisijaksi valitaan 400 millimetriä, jolloin eristetilan paksuus on 110 millimetriä. Tällöin lämpövuon suuruus on noin 5,7 W/°C. Mittaustilanteessa sisäosan lämpötila vaihtelee  $\pm 3$  °C altaan lämpötilan ympärillä. Tällöin lämpövuon suuruus on yli  $\pm 17$  W, mitattavan lämpötehon ollessa 50...200 W. Tämä on suhteellisen paljon, sillä järjestelmään kuuluu suuren lämpöhäviön omaavia komponentteja. Näitä ovat kannen ja astian välinen tiivistepinta ja läpiviennit, sillä näissä kohdissa sisäsäiliöstä on metallinen lämpösilta ulkopintaan. Ennen kuin näiden suuruutta voidaan arvioida, on laitteen toimintaperiaate ja seinämäpaksuudet selvitettävä. Lopullinen arvio lämpöhäviöistä esitetään "tulosten arviointi" -kappaleessa.



#### 4.5.2 Lujuusopillinen tarkastelu

Lujuusopillisella tarkastelulla varmistetaan rakenteen kyvystä selviytyä kuormituksista, jotka kohdistuvat siihen odotetun eliniän aikana. Rakennetta kuormittaa mekaaniset, termiset ja dynaamiset kuormat. Mekaanisia kuormituksia aiheuttavat paine, omapaino ja sisältö. Termisiä rasituksia syntyy astioiden välisestä lämpötilaerosta ja sen myötä estetystä lämpölaajenemisesta. Dynaamisia kuormituksia esiintyy esimerkiksi siirtojen yhteydessä, kun polttoaine tai kalorimetri lasketaan kovalle pinnalle.

Kalorimetriä ei katsota kuuluvaksi painelaitteisiin, sillä rakenne kuormittuu vain veden hydrostaattisen paineen vaikutuksesta. Esimerkiksi kauppa ja teollisuusministeriön päätöksen mukaan astia ei ole painesäiliö, jos höyrynpaine korkeimmassa sallitussa lämpötilassa on alle 0,5 bar yli normaali-ilmankehän paineen (KTMP 938/1999). Mittauspiirin veden yläpuolinen ilmatila on avoin, jolloin ylipainetta ei voi syntyä.

Tässä tarkastelussa tehdään alustava arvio tarvittavista materiaalipaksuuksista, missä huomioidaan vain mekaaniset kuormat. Ennen kalorimetrin valmistamista täytyy tehdä tarkempi lujuusanalyysi, missä huomioidaan erityyppiset kuormitukset. Vaikka kalorimetri ei ole painelaitte, on sen analyysissä hyvä noudattaa YVL-ohjeen 3.1 "Ydinvoimalaitoksen painesäiliöt" kohtaa 4.4.2 Lujuustekninen suunnittelu, sillä sen rakenne muistuttaa painesäiliön rakennetta.

##### Eristetila

Kalorimetrin kuorien välinen tila on suljettu, jolloin lämpötilan noustessa 100 °C nousee myös astian sisäinen paine. Tämän vaikutus voidaan arvioida ideaalikaasun tilanyhtälön avulla:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad (29)$$

missä  $p_1$  on paine,  $V_1$  on kaasun tilavuus ja  $T_1$  lämpötila lähtötilanteessa ja  $p_2$  paine,  $V_2$  tilavuus ja  $T_2$  lämpötila lopputilanteessa (Valtanen 2010, 226). Tässä tapauksessa astian tilavuus pysyy vakiona, jolloin  $V_1 = V_2$ . Koska halutaan tietää alku- ja lopputilanteen välinen paineen nousu, kaava voidaan kirjoittaa muotoon

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (30)$$

Toisin sanoen paineen muutos riippuu vain lämpötilan muutoksen suuruudesta. Koska kalorimetri kasataan huoneenlämmössä,  $T_1 = 293 \text{ K}$  (20 °C) ja lopputilanne  $T_2 = 373 \text{ K}$  (100 °C). Näillä arvoilla suhdeluvuksi saadaan 1,3. Koska paine  $p_1$  on ilmakehän paine, ei painelaitteeksi määritelty raja 1,5 ylitä (KTMP 938/1999). Johtopäätöksenä eristetilan paine ei edellytä astian

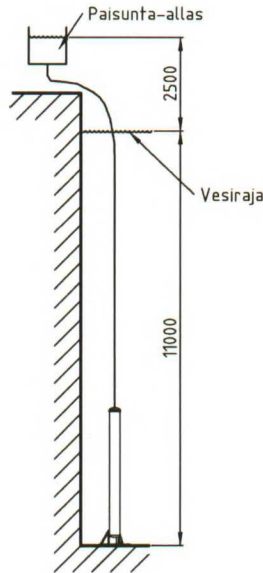
käsitlemistä painelaitteena. Lisäksi kuoren ulkopuolella vaikuttaa hydrostaattinen paine, joka on huomattavasti suurempi kuin korkein eristetilassa vaikuttava paine.

### Sisäsäiliö

Tähän saakka sisäsäiliön halkaisijaksi on suunniteltu 180 mm. Katsaus materiaalityömittajien kuvastoihin osoittaa, että kyseisen kokoista putkea ei ole saatavilla. Seuraava saatavilla oleva koko on 204 millimetriä, jonka seinämäpaksuus on kaksi millimetriä. Halkaisijan kasvun seurauksena kalorimetrin vesitilavuus kasvaa 3,3 metrin matkalla noin 20 litraa. Tämän vesimäärän lämmittäminen kuudella asteella 50 W teholla kestää noin 2 h ja 47 min. Vastaavasti 200 W teholla lämmittämiseen kuluu noin 42 minuuttia.

Vaihtoehtona vesitilavuuden kasvattamiselle on valmistaa pienempää putkea suorasta levystä valssaamalla ja hitsaamalla. Hitsatulla rakenteella on hankala saavuttaa polttoainekammion suorusehtoa. Onkin perusteltua käyttää hivenen isompaa, mutta suoraa putkea.

Laitteistoon kuuluu paisuntasäiliö, joka sijaitsee altaan reunalla (Routamo & Toppila 2007). Säiliön veden pinta voidaan olettaa olevan 1,5 metrin korkeudella lattiaan nähden, jolloin kalorimetrin pohjalla vaikuttavan vesipatsaan kokonaiskorkeus on noin 13,5 metriä. Kuvassa 40 on havainnollistettu mittaustapahtumaa.



**Kuva 40. Kalorimetrin sijoitus kuormausaltaaseen.**

Vedestä aiheutuva hydrostaattinen paine muuttuu syvyyden funktiona kaavan

$$p = p_0 + \rho gh \quad (31)$$

mukaan (Valtanen 2010, 218), missä  $p_0$  on veden pintaan vaikuttava ilmanpaine,  $\rho$  on nesteen tiheys,  $g$  on putoamiskiihtyvyys ja  $h$  on nestepatsaan korkeus. Tässä tapauksessa hydrostaattista



painetta laskettaessa ei tarvitse huomioida ilmanpainetta, sillä samansuuruinen paine vaikuttaa kalorimetrin eristetilassa ja niiden vaikutus kumoaa toisensa. Koska polttoainenippu on noin 3,2 m korkea, voidaan kalorimetrin yläosan olettaa olevan noin 4,0 m korkeudella. Tämä aiheuttaa pienen paine-eron astian ylä- ja alaosan välillä. Sijoittamalla luvut ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $9,81 \text{ m/s}^2$  ja  $13,5 \text{ m} / 9,5 \text{ m}$ ) kaavaan, saadaan kalorimetrin sisäosaan vaikuttamaan noin  $0,9 \dots 1,3 \text{ bar}$  paine. Tarkastelun helpottamiseksi koko kalorimetriin sisäosaan oletetaan kohdistuvan korkeampi,  $1,3 \text{ bar}$  paine. Ulkokuoreen vaikuttaa hivenen pienempi paine, sillä paisunta-allas ei vaikuta sen hydrostaattiseen paineeseen. Myös tässä tapauksessa voidaan olettaa konservatiivisesti korkeamman  $11 \text{ m}$  vesipatsaan aiheuttaman  $1,1 \text{ bar}$  paineen vaikuttavan koko ulkokuoren alueella.

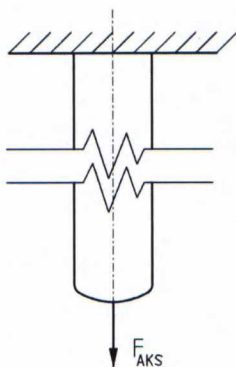
Paineen yksi ominaispiirteistä on se, että se vaikuttaa astian pintaan nähden kohtisuoraan joka kohdasta. Tämän vuoksi se aiheuttaa säiliön kuoreen aksiaali- ja kehäjännityksen. Aksiaalijännityksen suuruus voidaan laskea kaavalla

$$\sigma_a = \frac{pR}{2t} \quad (32)$$

ja kehäjännityksen kaavalla

$$\sigma_k = \frac{pR}{t}, \quad (33)$$

missä  $p$  on paine,  $R$  on astian säde putken seinämän puoleen väliin saakka ja  $t$  on putken seinämän paksuus (Parnes 2001, 394). Kaavoja vertaamalla nähdään, että sisäisen paineen kuormittamassa paineastiassa kehäjännitys on kaksi kertaa suurempi kuin aksiaalijännitys. Koska sisäastia roikkuu yläosan laippapinnan varassa, aksiaalijännitykseen täytyy huomioida myös rakenteen omapaino ja kuorma. Kuormassa täytyy huomioida astian vesitilavuuden massa, polttoainenipun massa, pumpun ja mittauslaitteiston massa. Tilanne on esitetty kuvassa 41.



**Kuva 41. Kalorimetrin sisäsäiliöön kohdistuva aksiaalivoima.**

Sisäsäiliön aksiaalikuormasta 48 % aiheutuu paineesta ja 52 % rakenteen ja sisällön painosta, taulukon 5 mukaisesti.

**Taulukko 5. Kalorimetrin sisäastian kuormat**

Kuvaus	Laatu	Aksiaalikuorma
sisäinen paine	0,13 MPa	4 000 N
polttoaine	220 kg	2 200 N
sisäputki	34 kg	350 N
mittauspiirin vesi	104 kg	1 000 N
komponentit	100 kg	1 000 N

Koska merkittävä osa aksiaalijännityksestä tulee muualta kuin paineen vaikutuksesta, on käytännöllisempää laskea se normaali-jännityksen kaavalla

$$\sigma_a = \frac{F_{aks}}{A}. \quad (34)$$

Kaavassa  $F_{aks}$  on sisäastiaan kohdistuva kokonaisaksiaalikuorma ja  $A$  on putken seinämän pinta-ala.

Sisäastian kehäjännitykseksi saadaan 6,6 MPa ja aksiaalijännitykseksi 6,8 MPa. Ruostumattomalle teräksen venymisraja 100 °C lämpötilassa on 155 MPa (SFS-EN 10216-5, 39). Tarkastelun perusteella sisäastian jännitykset jäävät reilusti venymisrajan alle, joten putki kestää siihen kohdistuvat voimat.

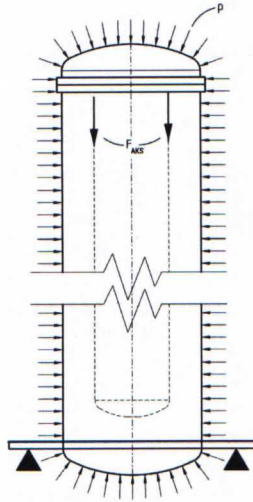
Tarkastelussa ei ole huomioitu tilannetta, missä kalorimetri käännetään sivuttain kuljetusta tai varastointia varten. Tällöin suurimmat jännitykset kohdistuvat laippapintaan ja siinä olevaan kehähitsiin. Onkin hyvin mahdollista, ettei rakenne kestä tällaista kuormitusta. Laitteen käyttöohjeessa tuleekin kieltää kootun laitteen kallistaminen kyljelleen.

### Ulkosäiliö

Lämpötarkastelun perusteella kalorimetrin ulkohalkaisijaksi valittiin 400 millimetriä. Materiaalitoimittajille tehdyn kyselyn perusteella parhaiten saatavilla oleva putkikoko on 406 x 3 millimetriä, joka otetaan myös lujuustarkastelun perustaksi. Putken alustavaksi pituudeksi oletetaan 3700 millimetriä.

Ulkosäiliön kuormittaa ulkoisen paineen lisäksi sisäsäiliön, kansimekanismin ja ulkokuoren massa. Ulkokuoreen kohdistuva aksiaalivoima ilman paineen vaikutusta on noin 6 500 N. Kaikki voimat pyrkivät puristamaan säiliötä kasaan, sillä astian tuenta tehdään pohjasta. Ulkosäiliön voimakuvio on kuvassa 42.





**Kuva 42. Kalorimetrin ulkosäiliöön kohdistuvat voimat.**

Rakenteessa esiintyy vetojännityksen sijaan puristusjännitystä, jolloin säiliön lommahdus on rakenteen mitoitusta rajoittava ilmiö. Lommahdus esiintyy ohutseinäisillä kappaleilla, jotka ovat puristusjännityksen alaisia. Lommahdukseen vaadittava voima on huomattavasti pienempi kuin mitä puristusjännityksen perusteella voisi sallia. Tarkasteluun voidaan käyttää ASME-standardin osaa III, ND-3133 (ASME 2011b, 31 - 38). Standardin kohta ND-3133 käsittelee ulkoisen paineen kuormittaman komponenttien lujuusmitoitusta.

Lieriömäisten säiliön kuorien mitoitus alkaa määrittämällä ulkohalkaisijan ja alustavan seinämän paksuuden suhde  $D_o/T$ . Laskentaan soveltuvat kaavat riippuvat siitä, onko suhde yli vai alle kymmenen. Koska kalorimetrin ulko-säiliön ja seinämän välinen suhde on yli kymmenen, käytetään seuraavaksi esitettyä laskentatapaa. Pituuden ja halkaisijan suhteen  $L/D_o$  ja halkaisijan ja seinämän paksuuden suhteen avulla määritetään kerroin  $A$  kuvaajasta (ASME 2011a, 748).

Kertoimen  $A$  suuruudeksi saadaan  $8 \times 10^{-5}$ , jolloin kerrointa  $B$  ei voida katsoa kuvasta HA-1 (ASME 2011a, 754). Sallittu paine lasketaan standardin kohdassa ND-3133.3 esitetyllä kaavalla

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_o/T)}, \quad (35)$$

missä  $E$  on materiaalin kimmokerroin. Menetelmällä sallituksi jännitykseksi saadaan 0,76 bar, mikä on pienempi kuin altaassa esiintyvä 1,1 bar paine. Rakenteen paineen kesto voidaan parantaa lisäämällä siihen jäykisterengas. Sijoittamalla rengas lieriön keskikohtaan säiliön laskennallinen pituus  $L$  puolittuu. Pituuden muutoksen jälkeen lasketaan uusi arvo kertoimelle  $A$ , jonka avulla voidaan määrittää kerroin  $B$  kuvasta HA-1. Kertoimen  $B$  avulla voidaan laskea lieriöosan uusi paineenkesto kaavalla

$$P_a = \frac{4B}{3(D_0 / T)}. \quad (36)$$

Lieriöosan paineenkestoksi saadaan 1,6 bar, mikä ylittää altaan hydrostaattisen paineen 1,1 bar. Jäykisterenkaalta vaadittu neliömomentti lasketaan standardin kohdan ND-3133.5 mukaan. Laskentaa varten täytyy päättää jäykisteen poikkileikkaus  $A_s$ , jonka avulla voidaan laskea kertoimen  $B$  arvo.

$$B = \frac{3}{4} \left( \frac{PD_o}{T_n + A_s / L_s} \right), \quad (37)$$

missä  $P$  on astiaan kohdistuva ulkoinen paine,  $T_n$  on materiaalipaksuus korroosiovaralla ja  $L_s$  on lieriön tukirenkaiden välinen etäisyys. Koska materiaalina käytetään ruostumatonta terästä ja siinä esiintyvä korroosio on vähäistä, paksuutena voidaan käyttää arvoa  $T$ . Kertoimen  $B$  avulla lasketaan kertoimen  $A$  arvo, kaavalla

$$A = \frac{2B}{E}. \quad (38)$$

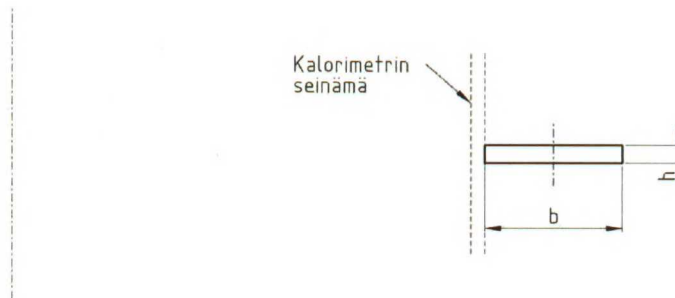
Jäykisteeltä vaadittu neliömomentti  $I_s$  määritellään kertoimen  $A$  avulla

$$I_s = \frac{D_o^2 L_s (T + A_s / L_s) A}{14}. \quad (39)$$

Suorakulmaisen profiilin neliömomentti lasketaan kaavalla

$$I_{sk} = \frac{hb^3}{12}, \quad (40)$$

missä  $h$  on suorakulmion korkeus ja  $b$  on leveys, kun lattatanko on asetettu kalorimetriin kuvan 43 mukaisesti (Valtanen 2010, 400).



**Kuva 43. Kalorimetrin jäykisteen sijainti ja mitat.**

Menetelmällä saatiin tulos, jonka mukaan kalorimetriin riittää yksi jäykisterengas. Renkaalta vaadittu neliömomentti on  $0,74 \text{ cm}^4$ , joka saavutetaan jäykisteellä jonka poikkileikkaus on vä-

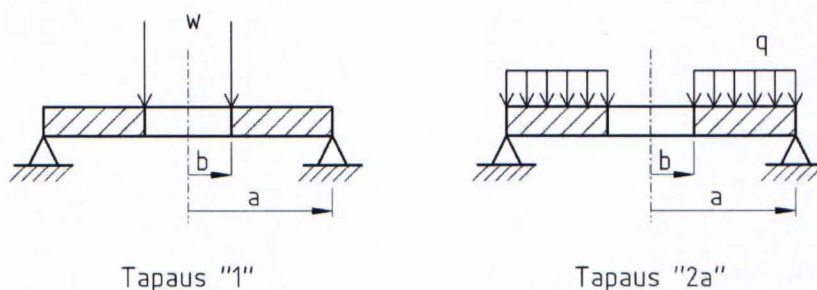


hintään  $4 \times 30 \text{ mm}$  ( $0,9 \text{ cm}^4$ ). Jäykiste voi olla myös tätä tukevampi. Kokoa muutettaessa on huomattava, että jäykkyys syntyy pääosin leveyssuuntaisesta sivusta  $b$ .

### Kuoret yhdistävä laippa

Laippatason paksuuden tulisi olla mahdollisimman ohut, jotta sen kautta johtuva lämpöteho olisi mahdollisimman pieni. Laippaa voidaan tarkistella ympyrärengaslaattana ja jota varten on kehitetty valmiita laskukaavoja. Koska laippaa rasittaa sisäsäiliöstä aiheutuva aksiaalivoima ja veden hydrostaattinen paine, on laskentatapauksiksi valittu tapaukset 1 ja 2a (Young & Budynas 2002, 459 - 464). Laatta käyttäytyy lineaarisesti, joten nämä kaksi erillistä tapausta voidaan laskea yhteen superpositio-periaatteen mukaisesti. Laatan tuenta on konservatiivisesti oletettu nivelletyksi. Tämän seurauksena laatta mitoitetaan itsekantavaksi, eikä se aiheuta momenttia kalorimetrin seinämiin.

Toinen vaihtoehto olisi olettaa laipan tuenta jäykäksi, jolloin tarvittava seinämäpaksuus olisi pienempi. Laippa kuitenkin taipuisi rasitusten alla ja aiheuttaisi taivutusta kalorimetrin ulko- ja sisälieriön yläosaan. Tämä menetelmä on työläs ja lisäksi löysä laippa on hankala tiivistää suurien taipumien takia. Tapauksien "1" ja "2a" voimakuviot on kuvassa 44.



**Kuva 44. Laipan kohdistuvat voimat.**

Tapauksessa "1" viivavoima kuormittaa laattaa sen sisäreunasta. Kehänsuuntaisen reunamomentin ratkaisemista varten täytyy ensin määrittää sisä- ja ulkosäteiden suhde  $b/a$ , jonka avulla saadaan kerroin  $K_M$ . Suurin reunamomentti vaikuttaa laatan sisäkehällä ja se lasketaan kaavalla

$$M_1 = K_M w a, \quad (41)$$

missä  $w$  on viivavoima ja  $a$  laipan ulkosäde. Tapauksessa "2a" kuormituksena on koko laippaan kohdistuva paine. Myös tässä tapauksessa määritetään kerroin  $K_M$ , suhdeluvun  $b/a$  avulla. Suurin reunamomentti saadaan kaavasta

$$M_{2a} = K_M q a^2, \quad (42)$$

missä  $q$  on laippaan kohdistuva paine ja  $a$  on laatan ulkosäde. Koska molemmissa tapauksissa suurin reunamomentti vaikuttaa laatan sisäreunaan, suurin momentti saadaan laskemalla tapauksen "1" ja "2a" momentit yhteen

$$M = M_1 + M_{2a}. \quad (43)$$

Taivutusmomentista aiheutuva jännitys lasketaan kaavalla

$$\sigma = \frac{6M}{t^2}, \quad (44)$$

missä  $t$  on laipan paksuus. Sijoittamalla kaavaan ruostumattoman teräksen suurin sallittu jännitys  $100^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja huomioimalla varmuusmarginaali, voidaan ratkaista laipan paksuus.

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{6M}{\sigma_{\text{sall}}}}, \quad (45)$$

missä  $t_{\min}$  on laipan minimipaksuus ja  $\sigma_{\text{sall}}$  on sallittu jännitys (Young & Budynas 2002, 457). Sijoittamalla arvot kaavaan, laipan minimipaksuudeksi saadaan 13,6 millimetriä. Tämän perusteella laipan paksuudeksi valitaan 15 millimetriä. Taivutusjännityksen lisäksi laattaa kuormittaa leikkausjännitys, mutta koska sen vaikutus on pieni ja käytetty laskentamenetelmä on konservatiivinen, ei sen vaikutusta tarvitse huomioida.

Jotta kannen tiivistäminen voidaan tehdä varmaksi, ei laipan sisäreunan pystysuuntainen siirtymä saa olla liian suuri. Siirtymän suuruus saadaan laskettu tapauksen "1" ja "2a" yhteydessä esitetyillä kaavoilla. Viivakuormituksen tapauksessa kerroin  $K_y$  etsitään suhteen  $b/a$  avulla ja siirtymä saadaan laskettua kaavalla

$$y_1 = K_y \frac{wa^3}{D}, \quad (46)$$

missä  $w$  on viivakuormitus,  $a$  on laipan ulkosäde ja  $D$  on laattavakio. Laattavakio lasketaan kaavalla

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (47)$$

missä  $E$  on kimmokerroin,  $t$  on laatan paksuus ja  $\nu$  on poissonin vakio. Paineen aiheuttama siirtymä saadaan kaavalla

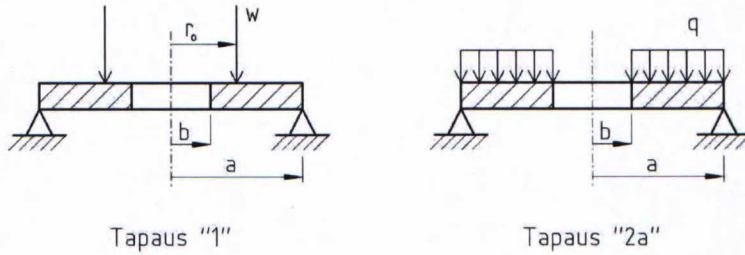
$$y_{2a} = K_y \frac{qa^4}{D}. \quad (48)$$



Sijoittamalla arvot kaavaan ja laskemalla siirtymät yhteen, laipan taipumaksi saadaan 0,5 millimetriä. Tämän kokoluokan taipuma on helposti tiivistettävissä ja tämän vuoksi se voidaan sallia.

### Pohjalevy

Polttoaine tukeutuu kalorimetrin sisälieriön pohjassa olevaan laippaan. Levyä kuormittaa polttoaineen lisäksi mittauspiirin veden hydrostaattinen paine. Osan tarvittava paksuus voidaan tarkastaa ympyrälaatta-teorian avulla. Laskennassa on käytetty Youngin & Budynasin esittämää tapausta "1" ja "2a", joiden voimapiirrokset on kuvassa 45 (2002, 459). Ensimmäisessä tapauksessa kuormitus ei kohdistu laipan sisäreunaan, joten laskennassa joudutaan turvautumaan eri kaavoihin kuin kuoret yhdistävän laipan tapauksessa. Tapauksen 2a laskentaa voidaan helpottaa valitsemalla alustavasti mitta  $b$  siten, että suhteesta  $b/a$  tulee 0,3.



**Kuva 45. Pohjalevyn kohdistuvat voimat.**

Molemmissa tapauksissa suurin taivutusmomentti vaikuttaa levyn sisäreunalla ja näiden vaikutus voidaan laskea yhteen superpositio-periaatteella. Kun rengasmaisen kuormitus ei kohdistu laipan reunaan, joudutaan määrittämään kertoimet  $C_7$  ja  $L_9$ .

$$C_7 = \frac{1}{2}(1-\nu^2)\left(\frac{a}{b} - \frac{b}{a}\right) \quad (49)$$

$$L_9 = \frac{r_0}{a} \left\{ \frac{1+\nu}{2} \ln\left(\frac{a}{r_0}\right) + \frac{1-\nu}{4} \left[ 1 - \left(\frac{r_0}{a}\right)^2 \right] \right\} \quad (50)$$

Kerroin  $C_7$  kuvaa laatan geometriaa ja  $L_9$  on riippuvainen viivakuorman  $r_0$  sijainnista laatalle. Viivamomentti saadaan kaavalla

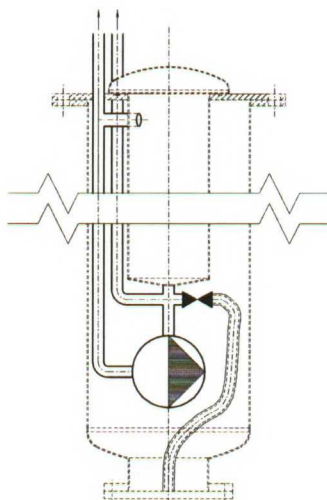
$$M_1 = \frac{wa_2(1-\nu^2)}{r} \frac{L_9}{C_7}, \quad (51)$$

jossa  $r$  on momentin laskentakohda laatalle. Koska suurin momentti on laatan sisäreunalla,  $r = b$ . Mittauspiirin paineen aiheuttama reunamomentti voidaan laskea kaavalla (42). Laskemalla momentit yhteen, voidaan pohjalevyn paksuus laskea kaavalla (45). Menetelmän lopputuloksena levyn vähimmäispaksuudeksi saadaan 7,0 mm.

### 4.5.3 Putkisto ja komponentit

Tavallisesti teollisuusputkiston mitoitus alkaa sisähalkaisijan valinnalla. Valintaan vaikuttaa virtausnopeudet ja painehäviöt. Tämän jälkeen valitaan rakenneaine ja lasketaan riittävä seinämän vahvuus. Seuraavaksi määritetään putkiston kannakointi, tehdään joustavuuslaskelmat ja jännitysanalyysi. Tämän jälkeen voidaan tehdä valmistussuunnittelu. (Hämäläinen 2006)

Tätä menetelmää ei voida soveltaa kalorimetrin sisäisen putkiston suunnitteluun. Laitteen putkiston muotoilu perustuu toiminnallisten ehtojen täyttämiseen ja halkaisijan valinta jäähdytevirtauksen suuruuteen. Putkisto koostuu kuvan 46 mukaisesti imu- ja painelinjan lisäksi tyhjennyslinjasta. Putkistoon liittyviä komponentteja ovat kierrätyspumppu ja tyhjennyslinjan sulkuventtiili. Näiden lisäksi mittauspiiristä on yhteys altaan reunalla olevaan järjestelmään niin paine- kuin imupuoleltakin.



**Kuva 46. Kalorimetrin sisäinen putkisto.**

Kalorimetrin mittauspiirin toiminnan tarkoituksena on ohjata jäähdytteen virtausta ja varmistaa laitteiston tasalämpöisyys. Riittävän jäähdytevirtauksen määrittämiseen ei ole olemassa tarkkaa menetelmää, mutta sen suuruutta voidaan arvioida käyttökokemusten perusteella. Ydinenergiajärjestö NEA:n raportissa on kerrottu Paksin voimalaitoksen käyttämän polttoaineen puhdistuslaitteiston jäähdytteen kierrosta.

#### **Pumpun ja putkiston mitoitus**

Kappaleessa 2.7 on puhdistuslaitteiston ja onnettomuuden kuvaus. NEA:n raportin mukaan puhdistuslaitteessa oli 30 polttoainenippua, joiden kokonaislämpöteho oli 241 kW. Puhdistuslaitteen pääpumpun tuottama massavirta oli 200 - 250 t/h. Väliaikaisen jäähdytyspumpun tuotto oli 20 t/h. (NEA 2008, 6-20)



Näillä tiedoilla yhden nipun keskimääräiseksi tehoksi voidaan päätellä noin 8 kW. Olettamalla, että virtaus jakautuu tasaisesti jokaiselle nipulle, saadaan yhden polttoainenipun jäähdytevirtaukseksi 6,67 - 8,33 t/h eli noin 110 - 140 l/min. Tästä riittäväksi jäähdytevirtaukseksi yhtä kilowattia kohden saadaan 13,9 - 17,4 l/min/kW.

Toisaalta tiedetään, että onnettomuuteen johtaneen tilanteen massavirta 20 t/h oli liian vähän. Tällöin yhden polttoainenipun läpi meneväksi virtaukseksi saadaan 0,666 t/h eli noin 11 l/min. Kilowattia kohden tämä tekee 1,4 l/min/kW. Tämä on noin 1/10-osa riittävästä virtauksesta.

Edellisessä tarkastelussa on tehty oletus virtauksen jakautumisesta tasan kaikkien nippujen kesken. Pahiten tukkeutuneissa nipuissa virtaus oli todennäköisesti keskimääräistä pienempi. Lisäksi jäähdytteen virtausnopeus vaikuttaa sen tehokkuuteen. Hiljaisilla nopeuksilla virtaus on laminaarista ja kovilla nopeuksilla turbulenttista (Holland & Bragg 1995, 6). Laminaarisessa virtauksessa veden nesteen sekoittuminen on vähäistä ja sillä on pieni virtausvastus. Lämmön siirtymisen kannalta turbulenttinen virtaus on edullisempaa, sillä tällöin polttoaineen pinnalle ei muodostu eristävää laminaarista vesikerrosta.

Paksin tapauksessa on yhteneväisyyksiä tämän suunnittelutyön kanssa, sillä puhdistettava polttoaine oli samantyyppistä kuin kalorimetrillä tutkittava polttoaine. Tämän vuoksi polttoaineen virtausominaisuudet vastaavat toisiaan. Toiseksi, mittauslaitteistoon tulee vain yksi polttoainenippu kerrallaan, joten virtauksen jakautuminen voidaan arvioida tarkemmin. Tarkastelun tuloksia voidaan siis soveltaa kalorimetrin suunnitteluun.

Tutkitavan polttoaineen lämpöteho on 50 - 200 W riippuen jäähtymisajasta. Suuremmalla 0,2 kW teholla riittävä jäähdytevirtaus on 2,8 - 3,5 l/min. Järjestelmä kannattanee varustaa tätä suuremmalla pumpulla turvamarginaalien ja jäähdytteen sekoittumisen varmistamiseksi. Esimerkiksi SKB:n käyttämä pumppu, jonka tuotto on 60 l/min, voisi soveltua mittauspiirin sekoituspumpuksi. Tarkastelemalla tämän kokoluokan pumppujen teknisiä tietoja, voidaan valita pumpun virtaukselle sopiva putkisto. Soveltuvien pumppujen tiedot ovat taulukossa 6.

#### **Taulukko 6. Sekoituspumpuksi sopivien mallien teknisiä tietoja.**

Valmistaja	Malli	Tuotto [l/min]	Moottoriteho [W]	Imu- liitäntä	Paine- liitäntä	Lähde
Iwaki	MX-70M	50	150	1"	1"	www.iwaki.fi
March pumps	5C-MD	55	100	1"	1/2"	www.marchpump.com
March pumps	LC-3CP-MD	31	40	3/4"	1/2"	www.marchpump.com
Pulsafeeder	Isochem CMC1	115	-	1"	1"	www.teknopump.fi

Malleista huomataan, että liitännät putkistoon tehdään kierreliitoksella. Liitännän koko vaihtelee ½ - 1 tuuman välillä. Tämän perusteella putkiston imu- ja painelinja voidaan mitoittaa sisähalkaisijaltaan 25 millimetriseksi, mikä vastaa 1 tuuman kierreliitännän kokoa (SFS 2233). Suuri halkaisija on myös helppo supistaa pienempään mittaan sopivaksi.

Pumpun koko vaikuttaa sen tehon tarpeeseen. Mitä suurempi pumppu, sitä enemmän tehoa sen pyörittäminen vaatii. Koska pumppu sijaitsee kalorimetrin eristetilassa, siirtyy moottorin ottama teho suurelta osin mittausjärjestelmään. Moottorin tehon tarve on kuitenkin vaikea arvioida, sillä siihen vaikuttavat pumpun tilavuuden lisäksi järjestelmän hyötysuhde ja mittauspiirin virtausvastukset. Tämän vuoksi moottorille syötettävän sähkötehon määrää on tarkkailtava niin kalibroinnin kuin mittauksenkin aikana.

#### **4.5.4 Mittauksen instrumentointi**

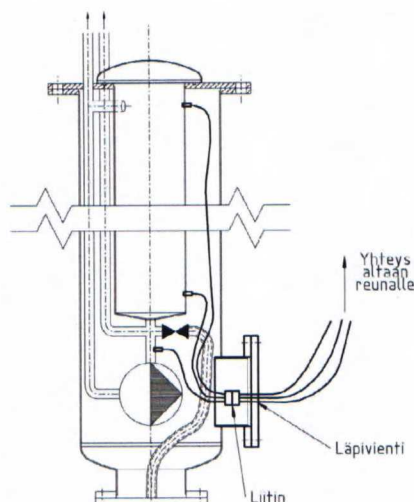
Mittauksen instrumentointiin ei oteta tässä suunnittelussa kantaa. Kalorimetrin eristetilaan on mitoitettu 100 millimetriä tilaa mittauskomponentteja varten ja ne voidaan kiinnittää polttoainepesään ja kiertoputkistoon haluttuihin kohtiin. Mittauspiiriin voidaan tehdä haluttu määrä läpivientejä mittausantureita varten.

Kalorimetrin pumppu, venttiilit ja mittauslaitteet tarvitsevat kaapeleita toimiakseen. Kaapelit tulee vetää altaan reunalta kalorimetrin eristetilaan. Kriittinen kohta on kalorimetrin ulkokuoren läpivienti, jonka tiivistäminen on tärkeää. Eristetilaan pääsevä vesi voi vaurioittaa sähkölaitteita ja lievimmässäkin tapauksessa se muuttaa laitteiston lämmönjohtumista ja tekee mittauksista epäkelpoja.

Anturit on kalibroitava säännöllisin väliajoin, jota varten ne täytyy irrottaa kalorimetristä. Tämä on huomioitu kalorimetrin rakenteessa, joka on helposti purettavissa huoltoa varten. Vesitiiviiden läpivientien tekeminen kaarevaan pintaan on vaikeaa, joten sitä varten kannattaa tehdä erillinen läpivientilaippa. Käsiteltävyyden kannalta se on hyvä sijoittaa kalorimetrin alaosaan, jolloin työskentely tapahtuu maan tasossa. Lisäksi laippaa voidaan tarvittaessa käyttää pumpun huolto-/tarkastusluukkuna.

Anturit on asennettava kalorimetriin ennen kokoonpanoa. Mittausjohdot tulee merkitä selkeästi ja kerätä nippuun läpivientilaipan kohdalle. Jotta laippa voidaan irrottaa, tulee johdot varustaa liittimillä. Sijoittamalla nämä kalorimetrin eristetilaan, vältetään liitosten tekemiseltä veden vaikutuksen alaisissa kohdissa. Kuvaan 47 on hahmoteltu läpivientilaipan sijainti ja mittausantureiden kaapelointi.





**Kuva 47. Kalorimetrin mittauslaitteiston kaapelointi.**

Mittauksia tulee olemaan useissa eri pisteissä. Käytettäessä tarkkaa nelijohdinmittausta, yksi lämpötilan mittausanturi tarvitsee neljä johtoa. Ennen kuin läpiviennin tarkka spesifikaatio voidaan asettaa, täytyy tietää mittauspisteiden määrä ja laatu.

#### **4.5.5 Kalibrointielementti**

Kalibrointi suoritetaan asettamalla kalorimetrin sisään elementti, johon on asennettu lämpövastus. Kalibrointia varten mittauspiirin lämpötila lasketaan altaan lämpötilaa alemmaksi, samaan lämpötilaan kuin todellisen mittauksen aloituksessa. Kalorimetrin mittauspiiriä lämmitetään vakioteholla ja sen lämpenemistä seurataan mittalaitteiden avulla. Suorittamalla kalibrointi useilla erisuuruisilla tehoilla saadaan luotua käyrästä, mistä näkyy järjestelmän lämpötilan muutos tehon funktiona.

SKB:n käyttökokemusten mukaan on tärkeää, että kalorimetrin kalibrointiin käytettävä elementti vastaa läheisesti tutkittavan polttoaineen ominaisuuksia (Sturek 2008). Tärkein ominaisuus on rakenteen sitoma lämpömäärä. Esimerkiksi jos kalibrointielementin sitoma lämpömäärä on todellista polttoaineenippua pienempi, niin kalibroimalla saatu lämpenemisnopeus on todellista tilannetta suurempi. Tuntemalla tarkasti todellisen ja kalibrointitilanteen välinen ero, voidaan kalibroinnilla saadut arvot suhteuttaa vastaamaan todellista tilannetta.

#### **Lämpötekkinen vastaavuus**

Tutkittava polttoaineenipun massa on noin 215 - 220 kg, polttoainetyypistä riippuen. Massasta 140 kg on uraanioksidia, 50 kg on zirkonium-pohjaista metallia ja loput ruostumatonta terästä. Arvot vaihtelevat hieman polttoainetyypin ja toimituserän mukaan. Näiden tietojen perusteella voidaan laskea polttoaineenipun rakennemateriaalien keskimäärin sitoma lämpökapasiteetti (taulukko 7). (Kekkonen 2012)

**Taulukko 7. Polttoainenipun lämpökapasiteetti.**

Materiaali	Massa $m$ [kg]	Ominaislämpökapasiteetti $c$ [J/(kgK)]	Lämpökapasiteetti $mc$ [J/K]
Uraanioksidi $UO_2$	140	270 <sup>1)</sup>	16 240
Zirkonium	50	345 <sup>2)</sup>	13 900
Ruostumatonta teräs	28	480 <sup>3)</sup>	13 440
Yht.	218		43 580

Lähteet: 1) USSR Atomic Energy Committee, Moscow 1986. 2) Neuvostoliiton ydinennergian käytön valtionkomitea, Moskova 1987. 3) Valtanen 2010, 330.

Yhteenvedon tuloksena polttoainenipun sitoma lämpökapasiteetti on 43 580 J/K. Koska kalibrointielementin rakenneaineena käytetään ruostumatonta terästä, on tätä vastaava teräsmassa 90,8 kg.

Polttoainenipuissa käytettyjen aineiden ominaislämpökapasiteetit ovat paljon pienempiä kuin veden [4182 J/(kgK)], joten on syytä tarkastella niiden syrjäyttämän veden määrä (taulukko 8).

**Taulukko 8. Polttoainenipun tilavuus.**

Materiaali	Massa $m$ [kg]	Tiheys $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Tilavuus $V$ [l]
Uraanioksidi $UO_2$	140	10,4 <sup>1)</sup>	13,5
Zirkonium	50	6,51 <sup>2)</sup>	7,7
Ruostumatonta teräs	28	8,00 <sup>2)</sup>	3,5
Yht.	218		24,7

Lähteet: 1) USSR Atomic Energy Committee, Moscow 1986. 2) Callister & Rethwisch 2011, A3

Osien yhteenlaskettu tilavuus on 24,7 litraa. Koska ruostumattoman teräksen tiheys on 8000 kg/m<sup>3</sup>, saadaan tiheyden kaavalla  $\rho = m/V$  laskettua kalibrointielementin teräsmassan tilavuudeksi 11,4 litraa. Jotta tarvittava määrä vettä saadaan syrjäytetyksi, täytyy elementissä olla onttoja rakenteita 13,4 litran edestä.

### Ulkomuoto

Mikäli kalibrointielementti muistuttaa ulkoisilta mitoiltaan polttoainennippua, voidaan se tukea kalorimetriin ja käsitellä samalla tavalla kuin todellista polttoainetta. Lämpöteknisesti ulkomuoto ei ole oleellinen asia, kunhan jäähyte pääsee virtaamaan elementin lävitse. Tehokkaan lämmönsiirtymisen kannalta elementissä tulisi olla paljon yhteistä pinta-alaa jäähdytteen kanssa.

Kalibrointielementti voidaan varustaa jäähdytevirtausta kuristavalla levyllä, jotta sen virtausvastus muistuttaisi polttoainennippua. Tällä on vaikutusta mittauspiirin pumpun tarvitseman tehon suuruuteen. Tämän vaikutus on kuitenkin todennäköisesti pieni, sillä mitattavan polttoaineen virtausvastus on suunniteltu mahdollisimman pieneksi.

Kalibroinnin tärkein komponentti on sähkövastus. Sen tuottama lämpöteho on siirryttävä mittauspiiriin mahdollisimman täydellisesti. Tämä onnistuu parhaiten sijoittamalla se mittauspiirin sisälle, johon on olemassa kaksi vaihtoehtoa. Se voidaan joko kiinnittää kalibrointielementtiin



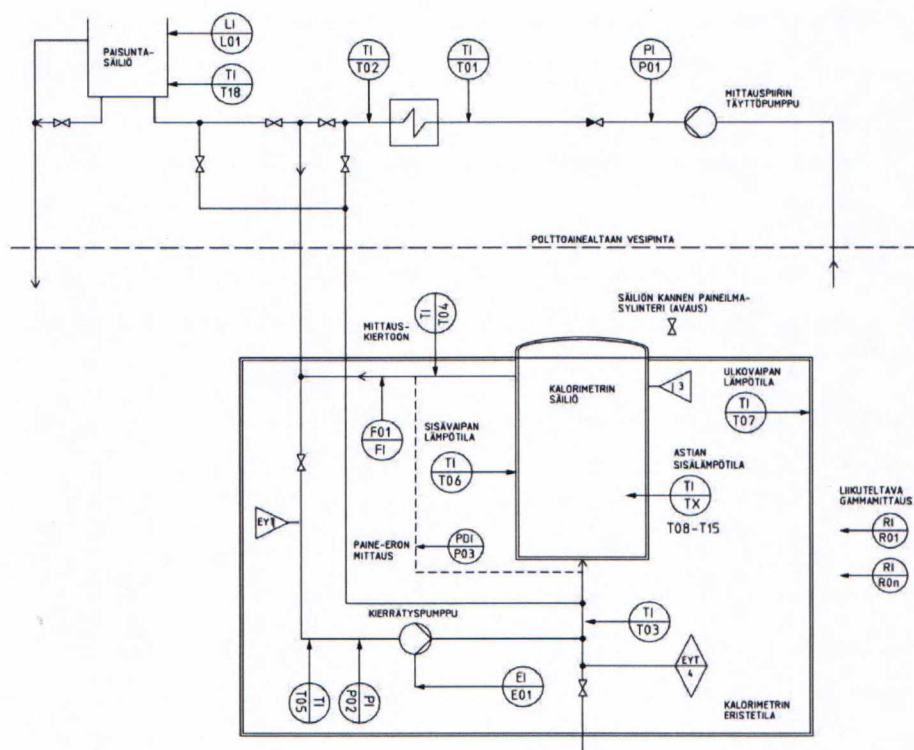
tai asentaa kiinteästi osaksi kalorimetriä. Molemmissa menetelmissä on omat hyvät ja huonot puolet.

Mikäli vastus on osa siirrettävää kalibrointielementtiä, on sen kaapeleille järjestettävä vesi- ja lämpötiivis reitti ulos kalorimetristä. Tämä vaatii läpiviennillä varustetun kannen, johon elementti ja vastus on kiinnitetty. Menetelmällä lämpöteho voidaan tuottaa samassa paikassa kuin se todellisuudessaakin syntyy. Tällöin lämmön jakautuminen vastaa todellista tilannetta.

Jos vastus asennetaan kalorimetrin vesitilaan kiinteästi, kalibrointiin voidaan käyttää laitteen omaa kantta. Tilanne edellyttää kalibrointielementin siirtämistä kalorimetriin, mutta erillisiä läpivientejä ei tarvita. Tämä tilanne vastaa paremmin lämmön johtavuuden kannalta todellista tilannetta. Tässä tapauksessa vastusta voitaisiin käyttää myös mittausten aikana tehostamaan lämpötilan muutosta, mutta sen vaikutuksista tulee tehdä erillinen tarkastelu.

#### 4.5.6 Muutokset putkitus ja instrumentointikaavioon

Kalorimetrin rakenteen kehittelyn seurauksena on päivitettävä alkuperäinen PI-kaavio, joka on esitetty kappaleessa 3.2. Kalorimetrin rakenteen suunnittelu lämpötiiveyden ehdoilla on vähentänyt läpivientien määrän minimiin ja siirtänyt altaassa olevat komponentit kalorimetrin sisään. Suurimmat muutokset ovatkin tapahtuneet kalorimetrin jäähdytyskierron linjoissa ja pumpun sijainnissa. Järjestelmä uusi PI-kaavio on kuvassa 48.



Kuva 48. Kalorimetrin päivitetty PI-kaavio.

Alkuperäisessä suunnitelmassa ollut turvallisuusluokiteltu linja mittauspiiristä altaaseen on poistettu. Turvallisuusluokitetun linjan tarkoituksena oli turvata jäähdytteen luonnonkierto tilanteissa, missä kannen avaaminen ja polttoaineen poistaminen on estynyt tilapäisesti. Tämä toiminto voidaan korvata kannen pakkoavauksella, joka avaa kalorimetrin kannen automaattisesti lämpötilan noustessa tai ohjausvoiman kadotessa. Tämän lisäksi kansi on varustettava mahdollisuudella avata se häiriötilanteissa käsin altaan reunalta. Linjan poistamista voidaan perustella myös järjestelmän suurella lämpökapasiteetilla ja -häviöllä verrattuna tutkittavaan tehoon.

Uudessa suunnitelmassa on poistettu mahdollisuus kierrättää mittausta edeltävä jäähdytyskierto mittauspiirin omalla pumpulla. Mahdollisuuden poistaminen ei vaikeuta mittauksen suorittamista, sillä kylmän jäähdytteen kierrätys voidaan tehdä mittauspiirin täyttöpumpun avulla. Täyttöpumpua voidaan käyttää myös häiriötilanteissa kalorimetrin jäähdyttämiseen. Laitteen turvallisuuden on kuitenkin perustuttava jäähdytteen passiiviseen kiertoon, aktiivinen jäähdytys voisi olla vain yksi osa laitteen kokonaisturvallisuudessa.

Yhteys paisuntasäiliöön on muuttunut, sillä se olisi vaatinut yhden ylimääräisen läpiviennin kalorimetriin. Yhteys on korvattu uusilla putkituksilla ja venttiileillä. Tämä väistämättä lisää järjestelmän komponenttien määrää ja sen myötä monimutkaisuutta. Tätä suurempi haittavaikutus on sillä, että paisunta-altaan ja mittauspiirin välillä on vähintään yksi sulkuventtiili. Huolimattoman tai huonosti opastetun toiminnan seurauksena kiertopiiristä voi tulla suljettu järjestelmä ja sen myötä paineistua lämpötilan nousun seurauksena. Tämä on huomioitava laitteen ohjausjärjestelmän suunnittelussa. Paineen nousun voi rajoittaa sijoittamalla mittauspiiriin paineenrajoitusventtiilin, murtokalvon tai muun vastaavan painesuojakomponentin. Suojakomponentin aukeamisen jälkeen on tärkeää, että se jäähdyte pääsee virtaamaan myös mittauspiiriin sisälle.

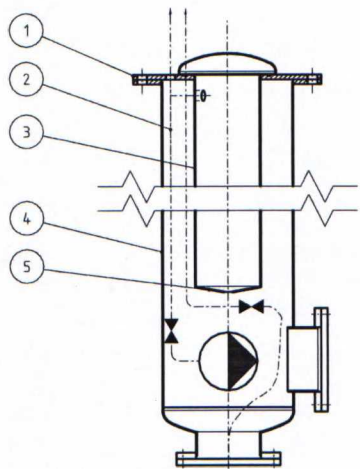
Polttoainealtaan veden joutuminen altaan ulkopuolelle on estettävä. Koska laitteiston täyttöpumppu, lämmönvaihdin, paisuntasäiliö sekä näiden vaatimat putkistot komponentteineen sijaitsevat altaan reunalla, voi niiden vikaantuminen tai vuotaminen johtaa veden pääsemisen altaan reunalle. Tämän välttämiseksi on kehitettävä vuotovesien keräysjärjestelmä, minkä kautta vesi pääsee valumaan takaisin altaaseen.



## 5 Tulosten arviointi

### 5.1 Kehitetty laitekonsepti

Kehitetyn laitekonseptin ajatuksena on se, että mittauksen aikana ei olisi massavirtaa kalorimetristä sen ulkopuolelle. Tällä menettelyllä lämpövuoto laitteen ja ympäröivän altaan välillä voidaan pitää mahdollisimman pienenä ja helpommin ennustettavana. Lisäksi laitteiston rakenne on yksinkertainen verrattuna ulkoisen kiertopiirin omaavaan järjestelmään. Laitteiston pumppu ja tarvittava putkisto on sijoitettu kalorimetrin eristetilaan kuvan 49 mukaisesti.



**Kuva 49. Kehitetty konsepti.**

Kuvassa 49 numeroitujen rakenteiden mitat esitetään taulukossa 9. Osien mitoitus perustuu joko lujuus-, lämpö- tai virtausteknisiin ehtoihin, jotka on esitetty kappaleessa 4.5.

**Taulukko 9. Rakenteen päämitat.**

Osa	Nimitys	Materiaali	Muoto ja mitat
1	Kansilaippa	1.4301	Ø540 / Ø200 x 15 mm
2	Putkisto	1.4301	DN25
3	Sisäputki	1.4301	Ø204 x 2 mm, L = 3300 mm
4	Ulkoputki	1.4301	Ø406 x 3 mm, L = 3700 mm
5	Pohjalevy	1.4301	Ø200 / Ø 25 x 7 mm

### 5.2 Vaatimusten täyttyminen

Kalorimetrille asetetuissa vaatimuksissa on huomioitu ydinturvallisuus, mittaustekniset näkökohdat, laitteen käsittely ja viranomaisvaatimukset. Vaatimukset ovat samat kuin kuvassa 20 ja ne ovat korostettu kursivilla.

*Käyttö- ja suunnittelulämpötila 50/100 °C on huomioitu komponenttien mitoituksessa. Tällä on vaikutusta mm. lämmön johtuvuuteen, lämpölaajenemiseen ja materiaaliominaisuuksiin. Lämpötilan asettamat vaatimukset eivät aiheuta rajoituksia kalorimetrin käytölle.*

*Suunnittelussa on huomioitava altaan hydrostaattinen paine. Paine 1,3/1,1 bar (ylip.) on hieman suurempi mittauspiirin sisällä kuin ympäröivässä altaassa. Sisäinen paine ei kuitenkaan aiheuta suuria voimia kalorimetrin seinämiin. Ulkoista voimaa vastaan tulee varautua jäykisterenkaalla, mikä estää ulkokuoren lommahtamisen.*

*Mitoitus VVER-440 polttoaineen mukaan AV144,  $L = 3217$  mm. Polttoainetyypillä on vaikutusta kalorimetrin sisämittojen lisäksi jälkilämpötehon suuruuteen. Polttoaineen koko on huomioitu sisäosan mitoituksessa ja kalorimetrin kokonaiskorkeuden raja-arvossa. Lämpötehon suuruus vaikuttaa mittauksen toteuttamiseen ja järjestelmän toimintaa on arvioitu mittauksen toteutettavuus kappaleessa.*

*Mittaus on kyettävä suorittamaan työpäivän aikana (8 h) ja Kiehumisvara niin suuri, että voidaan sallia 8 h korjausaika arvioidaan mittauksen toteutettavuus -kappaleessa.*

*Veden virtauksen tulee olla luonnollinen, eli ylöspäin. Kalorimetrin kiertopiirin putkisto liittyy kalorimetrin sisäosan ylä- ja alaosaan, jolloin virtaus kulkee koko kalorimetrin lävitse. Jäähdytteen kiertosuunta tulee huomioida pumpun ja moottorin asennuksessa ja jäähdytysvaiheen kierrossa.*

*Laitteen käyttäjällä on oltava reaaliaikainen tieto laitteen sisäisistä olosuhteista (lämpötila, paine, jäähdytteen virtaus). Tässä suunnittelutyössä ei oteta kantaa mittauksen toteuttamiseen. Mittauspiirin paineen nousu ei ole todennäköistä, sillä piiristä on avoin yhteys altaan reunalla olevaan paisunta-altaaseen.*

*Laite ei saa aiheuttaa polttoaineeseen ulkoisia rasituksia. Kalorimetrin sisäastia pyritään saamaan pystysuoraan asentoon käyttämällä seinämien rakenneaineena tehdasvalmisteista putkea. Tällöin polttoaine asettuu astian sisään suoraan, eikä hankaudu seinämiä vasten. Kansi voi osua polttoaineeseen, mikäli se sulkeutuu kesken polttoaineen siirron. Kannen mekanismin suunnittelua ei tehdä tässä työssä.*

*Häiriötilanteessa laitteiston on mentävä turvalliseen tilaan, eli vähintään luonnon jäähdytekierto säilyy. Tähän varaudutaan sellaisten komponenttien valinnalla, jotka menevät turvalliseen asentoon käyttövoiman kadotessa. Tärkeimmät komponentit ovat kannen avausmekanismi ja tyhjennyslinjan venttiili. Komponentteja ohjataan valvontakeskuksen kautta, joten komponentit on valittava mittausjärjestelmän suunnittelun yhteydessä.*



*Kansi on voitava avata käsin altaan reunalta, laitteen on oltava vakaa kaikissa käyttötilanteissa ja laitteessa on oltava selkeät ja kestävät nostopisteet eivät kuulu tämän työn laajuuteen ja ne on huomioitava yksityiskohtaisessa suunnittelussa.*

*Täytettävä kaikki viranomaisvaatimukset.* Suunnittelun aikana on tärkeintä varmistua rakenteen kestävydestä ja vakaudesta. Tätä varten tärkeimmistä komponenteista on tehty alustavat lujuuslaskut. Lopulliset laskut voidaan tehdä yksityiskohtaisen suunnittelun yhteydessä, kun tiedetään läpivientien sijainti ja koko, kannen aiheuttamat rasitukset ja mittauspiirissä käytettävien komponenttien ominaisuudet. Suunnittelijan tehtävänä on myös laatia tarvittavat dokumentit, joiden avulla varmistutaan valmistuksen ja asennuksen aikaisesta laadusta.

*Rakenteen suurin mahdollinen korkeus on 4 metriä.* Rakenteen suurin korkeus on huomioitu suunnittelussa, kun etsittiin vaihtoehtoja kiertopiirin pumpun sijoituspaikalle.

*Toimilaitteiden on oltava kaukokäyttöisiä.* Tämä kuuluu mittausjärjestelmän suunnittelun piiriin.

*Laite on säteilysuojellisesti turvallinen.* Säteilysuojelu on huomioitu materiaalivalinnoissa ja rakennemuotoilussa. Materiaaleiksi on valittu hyvin säteilyä kestäviä aineita. Rakennemuotoilussa on vältetty koloja ja pusseja, joihin säteileviä hiukkasia voisi kertyä.

*Materiaalina on käytettävä ruostumatonta terästä.* Teräsosat on mitoitettu ruostumattoman teräksen 1.4301 ominaisuuksien mukaan. Mitoituksessa ei tarvitse huomioida korroosiovaraa, sillä materiaalin syöpyminen on hidasta. Muiden materiaalien määrä on vähäinen, eikä niitä käytetä turvallisuuden kannalta kriittisissä kohdissa.

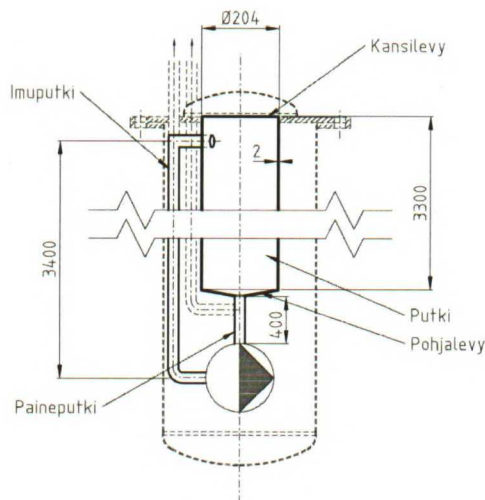
Vaatimuslistassa esitetyt vaatimukset on otettu huomioon soveltuvin osin ja huomioimatta jääneille vaatimuksille on osoitettu suunnittelun vaihe, jolloin ne on huomioitava. Mitään oleellista ei ole siis jäänyt huomiotta, joten tähän saakka tehty suunnittelu voidaan vahvistaa päteväksi.

### **5.3 Mittaukseen toteutettavuus**

Mittaukseen kuluvaksi ajaksi on asetettu kahdeksan tuntia. Tämän toteutumista voidaan tarkastella laskennallisesti etukäteen. Tarkastelussa täytyy huomioida rakenteiden ja mittauspiirin vesitilavuuden sitoma lämpömäärä.

#### **5.3.1 Rakenteiden sitoma lämpömäärä**

Kaikki mittauspiirin kanssa kosketuksissa olevat rakenneosat sitovat itseensä lämpöä. Tarkastelussa on oletettu, että kaikki piirin osat ovat tasalämpöisiä ja seuraavat mittauspiirin lämpötilaa. Tarkasteltavat komponentit on merkitty kuvaan 50.



**Kuva 50. Kalorimetrin lämpöä sitovat rakenteet.**

Tarkastelussa huomioidaan vain mittauspiirin metalliosat, polttoainenippu ja vesitilavuus. Tässä ei huomioida laippapinnan vaikutusta, yhteyksiä pinnalle, pumppua, polttoainetta, mittausantureita tai muita mittauspiiriin liittyviä komponentteja.

Taulukkoon 10 on koottu mittauspiirin rakenneosat, niiden massat, ominaislämpökapasiteetti ja niiden sitoma lämpömäärä. Lämpömäärä on laskettu kaavalla  $Q = cm$ , missä  $c$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti ja  $m$  on kappaleen massa.

**Taulukko 10. Mittauspiirin osaluettelo.**

Osa	Mitat [mm]	Paino [kg]	Aines	Ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]	Rakenteen sitoma lämpömäärä [J/K]
Putki	204x2 L=3300	33,5	1.4301	500	16 764
Pohjalevy	Ø200x7	1,8	1.4301	500	880
Kansilevy	Ø200x2	0,5	1.4301	500	250
Imuputkisto	Ø33,7x2 L=3400	5,4	1.4301	500	2 703
Paineputki	Ø33,7x2 L=400	0,6	1.4301	500	318
		41,8			
					20 915 J/K

Rakenneosien lisäksi myös mittauspiirin vesi sitoo lämpöä. Sen vaikutus saadaan laskemalla yhteen järjestelmän sisältämän veden massa ja kertomalla se ominaislämpökapasiteetilla (taulukko 11).

**Taulukko 11. Mittauspiirin tilavuus.**

Osa	Mitat [mm]	Tilavuus [l]	Paino [kg]	Ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]	Rakenteen sitoma lämpömäärä [J/K]
Putki	204x2 L=3300	103,7	103,67	4 182	433548
Imuputkisto	Ø33,7x2 L=3400	2,4	2,36	4 182	9870
Paineputki	Ø33,7x2 L=400	0,3	0,28	4 182	1171
Polttoaine		24,7		4 182	-103295
					341 293 J/K
					106,31



Systeemin kokonaislämpömäärä saadaan laskemalla yhteen rakenneosien ja järjestelmän vesitilavuuden sitomat lämpömäärät (taulukko 12). Polttoaineen lämpömäärä on katsottu taulukosta 5.

#### Taulukko 12. Mittauspiirin sitoma lämpömäärä.

Osa	Lämpömäärä yht.
Rakenneosat	20 915
Polttoaine	43 580
Vesitilavuus	341 293
	<b>405 788 J/K</b>

Kokonaislämpömäärän perusteella voidaan laskea niiden lämmittämiseen kuluva aika, kun tiedämme lämpötehon vaihtelevan 50...200 W välissä. Mittaukseen kulunut aika voidaan laskea kaavalla  $t = Q/P$ , missä  $t$  on mittaukseen kuluva aika,  $Q$  on lämpömäärä ja  $P$  on lämmitysteho. Kaava ei huomioi lämpöhäviöiden vaikutusta, joten arvio tilanteesta on hyvin karkea. Mittauspiirin lämpenemiseen kuluva aika on esitetty taulukossa 13.

#### Taulukko 13. Mittauspiirin lämpenemiseen kuluva aika.

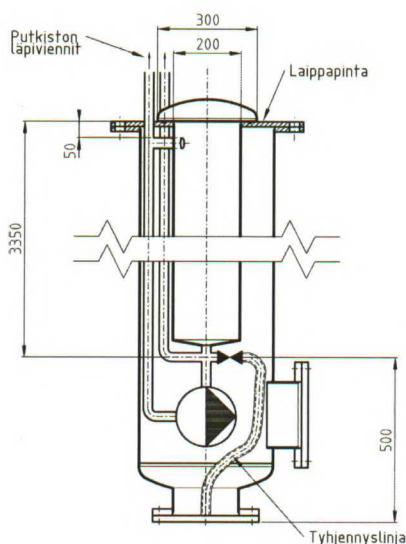
Teho [W]	Lämpötilaero [°K]	lämpömäärä [J/K]	Aika [h]
50	6	405 788	<b>13,5</b>
200	6	405 788	<b>3,4</b>

Kun suunniteltu mittausaika oli 8 tuntia, niin lopputuloksesta voimme huomata, että 50 watin lämmitysteholla mittaamiseen kuluu huomattavasti kauemmin. Mittauksen kestoon tulee lisätä polttoaineen siirtoihin kuluva aika, joka kasvattaa mittauksen kokonaiskestoa. Asettamalla mittaukseen kuluvaksi ajaksi 6,5 tuntia, järjestelmän lämpötehon tulee olla vähintään 104 wattia.

Todellisessa järjestelmässä pumpun teho siirtyy suurimmalta osaltaan mittauspiiriin. Tästä johtuva tehon nousu on väliltä 0 - 100 W riippuen pumpun tyypistä ja veden virtausvastuksesta. Tämä nopeuttaa mittautusta, mutta ennen lopullisen mittausajan arvioimista on huomioitava myös lämpöhäviöiden vaikutus.

### 5.3.2 Rakenteen lämpöhäviö

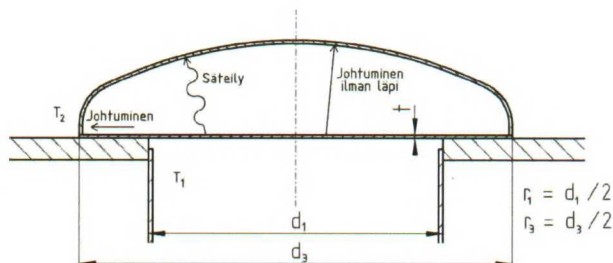
Lämpöhäviöiden arvioinnissa huomioidaan eristetilan läpi johtuvan ja säteilevän lämmön lisäksi metallisten lämpösiltojen vaikutus. Mittauspiirin ja altaan välisiä lämpösiloja ovat laippapinta, putkiston läpiviennit ja tyhjennyslinja. Kuvassa 51 on esitetty lämpösiltojen sijainti ja päämitat. Lämpöhäviöiden pienuutta edesauttaa rakenneaineena käytetty ruostumaton teräs, sillä sen lämmönjohtavuus on vain 1/3-osa tavallisen rakenneteräksen lämmönjohtavuudesta. Tämä on merkittävä tekijä komponenteissa, joissa on metallinen lämpösilta mittauspiirin ja altaan välillä.



**Kuva 51. Kalorimetrin suurimmat lämpöhäviöt.**

### Eristetila

Laippapinta jakaa eristetilän kahdeksi erilliseksi osaksi. Alaosa on yhtenäistä ilmatilaa koko kalorimetrin alueelta. Kalorimetrin eristetilän yläosan muodostaa kansi, jonka sisällä on ilmatila kuvan 52 mukaisesti. Kannen lämpöhäviöt muodostuvat metallisen pohjalevyn kautta johtumalla sekä ilmatilan läpi säteilemällä ja johtumalla.



**Kuva 52. Kannen lämpöhäviöt.**

Laskennassa mittauspiirin lämmön vaikutus on oletettu halkaisijan  $d_1$  alueelle. Altaan vesi vaikuttaa kannen kuperaan osaan, johon lämpö johtuu mittauspiiristä. Johtumisen suuruus lasketaan kaavalla (17), missä ulkohalkaisija  $r_2$  korvataan kannen ulkosäteellä  $r_3$ . Ilman läpi johtumalla siirtyvän lämmön määrä saadaan kaavalla (18). Säteilemällä karkaavan lämpötehon määrittämiseen käytetään kaavaa (25). Kannen kautta siirtyväksi lämpötehoksi saadaan  $0,8 \text{ W/}^\circ\text{C}$ .

Kappaleessa 4.5.1 kalorimetrin sisäisellä konvektiolla todettiin olevan merkittävä vaikutus lämpöhäviöön, joten eristetilassa tulee käyttää konvektion estävää eristettä. Sellaiseksi soveltuu esimerkiksi eristevilla, jonka asennetaan kalorimetrin sisäosan ympärille ennen asennusta. Vu-



rivillaisen eristematon lämmönjohtavuus on  $0,042 \text{ W/(mK)}$  (Çengel 2006, 850). Mikäli eristetilä oletetaan täytetyksi vuorivillalla, voidaan lämpöhäviö laskea kaavoilla (17) ja (18).

Eristevilla estää myös lämpösäteilyn, joten johtumisen kaavoilla voidaan laskea eristetilan alaosan kautta karkaava yhteenlaskettu lämpöteho. Alaosan lämpöhäviöksi saadaan  $1,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$ . Eristetilan yhteen laskettu lämpöhäviö on siis  $2,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$ , mikä on huomattavasti pienempi kuin ilman eristystä laskettu  $6,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$ .

### Laippapinta

Laippapinnan kautta häviävää lämpötehoa ei voida laskea tarkasti, sillä sen lämpöjakaumaa ei tunneta. Laipan pintoihin vaikuttaa erilaiset olosuhteet. Laipan sisäreunalla vaikuttaa mittauspiirin lämpötilassa oleva jäähyte, alapinta on eristetilassa, jonka lämpötila ei ole vakio ja yläpinta on kosketuksessa altaan veden kanssa. Yläpinnassa veden vaikutusalueeseen vaikuttaa laipan ja kannen muotoilun lisäksi tiivisteen tyyppi ja sijainti.

Lämpöhäviön suuruuden arviointia varten laippaa käsitellään putkena, jonka sisähalkaisija on sisäosan suuruinen ja ulkohalkaisija on kannen kokoinen. Putkesta johtuvan lämmön suuruus voidaan laskea kaavalla (17). Lämpöhäviön suuruudeksi saadaan  $4,6 \text{ W/}^\circ\text{C}$ .

### Putkiston läpiviennit

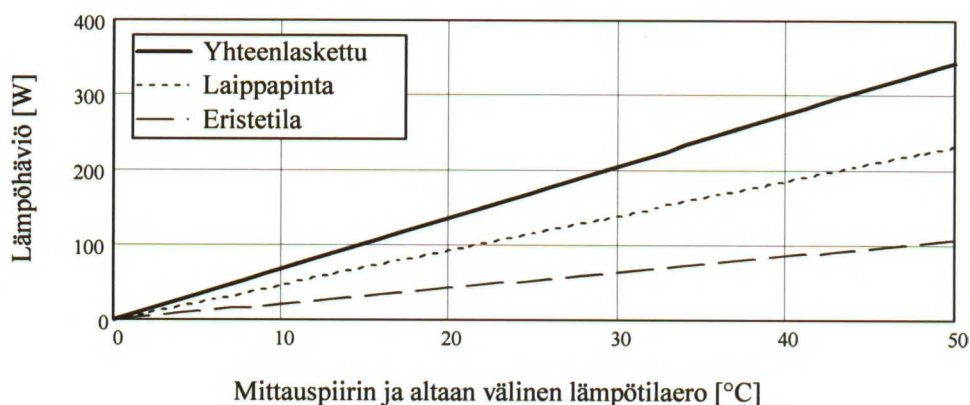
Putkiston lämpöhäviöt syntyvät kohdissa, joissa on metallinen yhteys mittauspiiriin ja polttoainealtaan veden välillä. Näitä kohtia ovat paine-, imu- ja tyhjennyslinja. Mittausten aikana näissä kohdissa ei ole virtausta, joten lämpöhäviöt syntyvät johtumalla. Johtumiseen täytyy huomioida putken ja sen sisällön vaikutus. Imulinjassa lämmön johtumispituus on 50 millimetriä, painelinjassa 3350 millimetriä ja tyhjennyslinjassa 500 millimetriä (kuva 51). Johtumalla siirtyvän lämmön suuruus voidaan laskea kaavalla

$$\Phi = \lambda A \frac{\Delta T}{l}, \quad (52)$$

missä  $\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus,  $A$  on lämpöä siirtävän pinnan poikkipinta-ala ja  $l$  on lämmön johtumisen pituus. (Valtanen 2010, 230). Putkiston läpivientien kokonaisvaikutus on noin  $0,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$ .

### Mittauspiirin toiminta

Kokonaislämpöhäviö aiheutuu pääosin laippapinnan ja eristetilan vaikutuksesta. Läpivientien vaikutus on noin 1 % yhteenlasketusta lämpöhäviöstä. Kuvassa 53 on esitetty kaikkien lämpöhäviöiden vaikutus.



**Kuva 53. Kalorimetrin lämpöhäviöt.**

Mittauspiirin yhteenlaskettu lämpöhäviö on 6,8 W/°C.

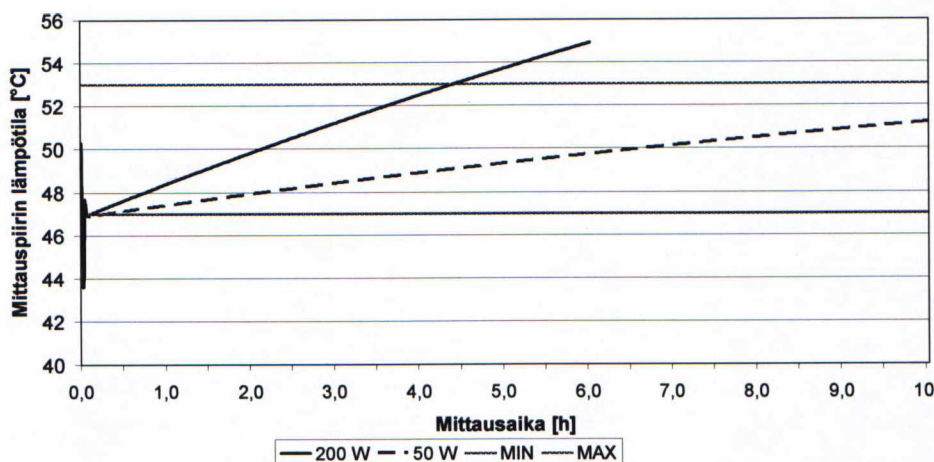
### 5.3.3 Kalorimetrin toiminnan simuloiminen

Kalorimetrinä on rakennettu matemaattinen malli Apros -ohjelmistoa hyödyntäen. Mallin avulla voidaan kuvata järjestelmän toiminta eri tilanteissa, ilman että koejärjestelmää tarvitsisi rakentaa. Mallin teossa on hyödynnetty Fortum Oy:n mallinnusosaamista, siten että lähtötietona on käytetty työn lopputuloksena syntyneitä rakennemuotoilua ja simuloinnit on tehnyt siihen perehtynyt henkilökunta. Simulointimalli perustuu Kustosen tekemään kalorimetrin malliin, joka on myöhemmin päivitetty vastaamaan tämän työn tuloksia (2012). Mallinnuksella saadaan tarkka kuva järjestelmän toiminnasta, sillä se huomioi komponenttien väliset massavirrat, lämpötilajakaumat ja -rakenteet.

Simulointeja on tehty 50, 200, 1000 ja 2 000 watin polttoaineen jälkilämpötehoille. Näistä 50 ja 200 wattia edustaa suunnittelun perustana olevia jälkilämpötehoja, 1000 watin avulla tutkitaan kalorimetrin rajoituksia ja 2 000 wattia pahinta mahdollista tilannetta, missä kalorimetriin asetetaan lyhyen jäähtymisajan omaavaa polttoainetta.

Simulointi alkaa kalorimetrin jäähdytyksellä, jonka aikana mittauspiirin jäähdytetään lämpötilaan 44 °C muutamassa minuutissa. Koska kalorimetrin rakenteet eivät ehdi luovuttaa niihin sitoutunutta lämpöä, niin jäähdytyksen jälkeen lämpötila nousee nopeasti 47 asteeseen. Mittauksessa lämpötilan vaihteluväli on 47...53 astetta, mitkä on myös kuvaajassa merkitty "min" ja "max" -viivoilla. Kalorimetriä ympäröivän altaan veden lämpötila on 50 astetta. Kuvassa 54 on kalorimetrin lämpötilan simuloitu käyttäytyminen 50 ja 200 W tehoilla.





**Kuva 54. Mittauspiirin toiminta 50 ja 200 W lämpötehoilla.**

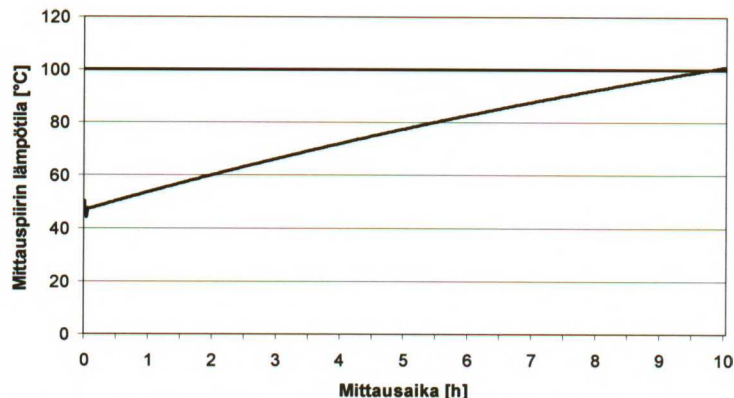
200 watin lämpöteholla piirin lämpötila nousee noin 0,7 astetta yhden tunnin aikana. Kuuden asteen lämpötilan muutos kestää noin neljä tuntia ja 20 minuuttia. Lämpötilan nousu on nopeampaa alle 50 asteen lämpötiloissa, koska kalorimetri imee lämpöä ympäröivästä altaasta. Ero ei ole suuri sillä lämpeneminen 47...50 °C tapahtui noin 10 % nopeammin kuin 50...53 °C.

Mittauksen tekeminen pienimmällä 50 watin lämpöteholla on hidasta. Lämpötilan muutosnopeus on noin 0,4 astetta tunnissa. Kymmenessä tunnissa lämpötila nousee hieman yli 51 asteeseen, mikä ei ylitä mittauksen ylärajaa. Kun tavoitteellinen mittausaika on yksi työpäivä, on mittauspiiriin lisättävä lämpötehoa tai mittausrajoja on kavennettava.

Parhaiten lämpöteho voidaan määrittää sillä hetkellä, kun mittauspiirin ja altaan vesi on samassa lämpötilassa. Tällöin ei tapahdu lämmönjohtumista rakenteiden välillä. Käytännössä rakenteet eivät ole täysin samassa lämpötilassa jäähtymisen seurauksena. Kuitenkin mittauksen aloitus- ja lopetuspisteiden tulee olla eri puolilla altaan + 50 °C lämpötilaa. Simulointituloksista voidaan havaita, että kaventamalla mittausalue 49 - 51 asteeseen saadaan 50 W mittausaika lyhenemään noin viiteen tuntiin. Tämä mahdollistaa mittauksen tekemisen yhdessä työvuorossa.

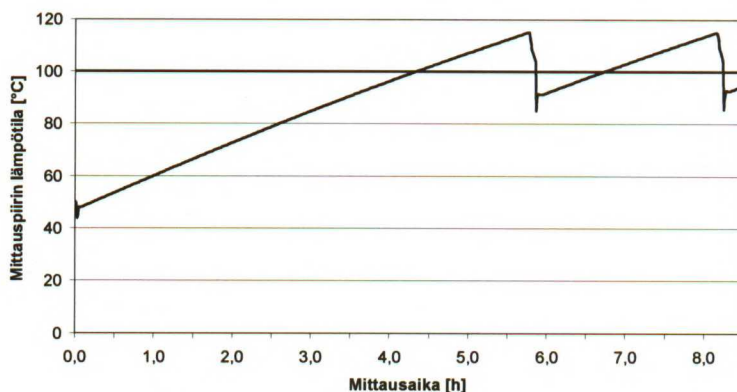
Toinen vaihtoehto on sijoittaa kalorimetriin lisälämmitin, jota voidaan käyttää kalorimerin kalibrointiin ja tehostamaan pienimpiä mittaustehoja. Tällöin mittauspiirin jäähtyttämiseen voitaisiin käyttää aina samaa toimintamallia, polttoaineen jälkilämpötehosta riippumatta.

Taustaselvityksen mukaan 1 000 watin teho on suurin, mitä vedenalaisilla kalorimetreillä on mitattu. Tämä teho antaa kuvan laitteiston toiminnasta ylikuormitustilanteissa. Kyseisellä teholla mittauksen vaatima kuuden asteen nousu saavutetaan tunnissa ja kalorimetrin suunnittelulämpötila yhdeksässä tunnissa (kuva 55). Tällöin turvallinen kahdeksan tunnin korjausaika on mahdollinen huomioden, että laitteen vikaantuminen tapahtuu heti mittauksen päätyttyä.



**Kuva 55. Mittauspiirin toiminta 1 000 watin lämpöteholla.**

Mikäli kalorimetriin asetetaan lyhyen jäähtymisajan omaavaa polttoainetta (2000 W), ylittää kalorimetrin lämpötila suunnittelulämpötilan 100 °C noin neljässä tunnissa (kuva 56). Tämä antaa kuitenkin operaattorille mahdollisuuden havaita virhe ja saattaa laite turvalliseen tilaan. Näin suuren lämpötehon mittaaminen ei tule kyseeseen, sillä kalorimetrin toiminta ei täytä turvallisuusehtoa "kiehumisvara niin suuri, että voidaan sallia 8 tunnin korjausaika".



**Kuva 56. Mittauspiirin toiminta 2 000 watin lämpöteholla.**

Simulaatio esittää mielenkiintoisen yksityiskohdan järjestelmän käyttäytymisestä, sillä veden kiehumisen 115 asteessa aiheuttaa höyryn purkautumisen paisuntasäiliöön. Purkauksen seurauksena säiliöstä pääsee järjestelmään noin 40 kg kylmää vettä, joka pudottaa mittauspiirin lämpötilan noin 90 asteeseen. Tämä on mahdollista, sillä mittauspiirin paineessa veden kiehumispiste on korkeampi kuin ilmanpaineessa. Lisäksi kalorimetrin ja säiliön välillä on yksi putkilinja, joka mahdollistaa vain yhden suuntaisen virtauksen kerrallaan.

Tulosten perusteella yksi jäähdytyspulssi vaatii noin 40 litraa vettä. Järjestelmän paisuntasäiliön tulisi sisältää vähintään tämän verran vettä, jotta mittauspiirissä olisi jäähdytyksen kannalta riittävästi vettä vielä lyhyen kiehumisen jälkeen.



### 5.3.4 Tulosten arvioiminen

Simulaatio tukee käsitystä, jonka mukaan mittaukset on mahdollista suorittaa kalorimetrin avulla. Pienimpien, lähellä 50 wattia olevien tehojen mittaaminen vaatii joitain erikoisjärjestelyitä, mutta lämpöteho on mahdollista havaita mittauspiiristä.

1 000 watin teho on suurin, mitä laitteilla voidaan turvallisesti mitata. Normaaaleissa olosuhteissa näin suurien tehojen mittaukseen ei ole tarvetta, koska laitteen päätarkoitus on mitata loppusijoitettavien polttoaineenippujen tehoa. Näiden polttoaineiden tehot ovat välillä 50... 200 wattia. Mietittäessä laitteen turvallista toiminta-aluetta on hyvä tietää teoreettiset rajat, mitä ei saa missään tilanteessa ylittää.

Korkea-aktiivisen, vasta reaktorista poistetun polttoaineen tapauksessa 2 000 watin teho johtaa suunnittelulämmön ylittämiseen neljässä tunnissa ja kiehumiseen 5,5 tunnissa. Tämä antaa laitteen operaattorille mahdollisuuden reagoida vaaratilanteeseen.

Suunniteltua suuremmat jälkilämpötehot lisäävät laitteen saamaa säteilyannosta. Rakenteessa käytetyn ruostumattoman teräksen ominaisuudet eivät juuri heikkene säteilyn seurauksena, mutta heikommin säteilyä kestävä kumi ja muovit joudutaan vaihtamaan useammin.

## 5.4 Epävarmuudet

Kalorimetrin suunnittelussa eteen tulevat mekaaniset ongelmat on ratkaistavissa tavalla tai toisella. Tätä suurempi ongelma on kalorimetrin mittaustarkkuus. Mikäli laitteen mittauksissa on epä johdonmukaisuutta, ei laitetta voi käyttää laskentatulosten validointiin. Routamo ja Toppila ovat esittäneet kalorimetrin mittauksen mahdollisia virhelähteitä (2007, 16). Virhelähteet voidaan jakaa mittaus- ja kalibrointivirheisiin, tiedonkäsittelyn virheisiin ja gammahäviön arvioinnin virheisiin. Tämän työn sisältöä sivuavat kalibrointivirheet.

Laitteen kalibrointi tehdään käyttämällä tunnettua kalibrointielementtiä, jonka lämpötekniset ominaisuudet tunnetaan. Elementin lämpökapasiteetin määrittäminen ei ole ongelma, sillä se voidaan suunnitella ja valmistaa haluttujen mittojen mukaan. Ongelmana on tietää polttoaineen tarkat ominaisuudet. Ominaisuudet muuttuvat hieman valmistajan ja mallin mukaan, joten yhtä yleispätevää arvoa ei voida antaa kaikille. Tästä syntyvät erot ovat kuitenkin korkeintaan muutaman prosentin luokkaa. Tätä tärkeämpi on tietää polttoaineen syrjäyttämän veden tilavuus, sillä veden ominaislämpökapasiteetti on lähes neljä kertaa suurempi kuin polttoaineen rakennearainien.

Käytettyjen polttoaineenippujen tilavuuden kokeellinen määrittäminen on haasteellista, sillä ne täytyy säilyttää jatkuvasti veden alla. Taulukossa 6 polttoaineen tilavuudeksi arvioitiin 24,7 litraa, mutta rakennearainien lisäksi jokaisessa polttoainesauvassa on pieni kaasutila. Kaasutilan suu-

ruus on muutamia kuutiosenttimetrejä, mutta koska polttoainenipussa on 123 sauvaa, niiden kokonaisvaikutus on noin satoja kuutiosenttimetrejä.

Jotta kalibrointielementtiin liittyvistä epävarmuustekijöistä päästäisiin eroon, on mietittävä vaihtoehtoisia ratkaisuja. Yksi vaihtoehto on Toppilan esittämä kahden mittauksen menetelmä, missä samaa polttoainennippua mitataan kahdesti (2009, 1). Toisen mittauksen aikana järjestelmään tuodaan tunnettu lisälämpöteho tai lisätään systeemin ominaislämpökapasiteettia. Muuttamalla vain yhden tuntemattoman suuruutta, voidaan tulosten muutoksesta laskea polttoainenipun lämpötehon suuruus. Menetelmän haittana on mittausajan kaksinkertaistuminen, sillä tämä täytyisi toistaa jokaiselle tutkittavalle polttoainenipulle.

Kiinteän lämpövastuksen asentaminen mittausjärjestelmään lisäisi järjestelmän mittaustarkkuutta kahdella eri tapaa. Kalibroitaessa järjestelmä kalibrointielementillä voitaisiin käyttää kalorimetrin omaa kantta, mikä poistaisi yhden muuttujan kalibrointi- ja mittaustapahtuman väliltä. Toisaalta todellisten mittausten tarkkuus voitaisiin todentaa kahden mittauksen menetelmällä. Tällöin jokaista nippua ei tarvitse mitata kahteen kertaan, mikä puolittaisi tarvittavien mittausten lukumäärän.

## 5.5 Tuotekehityksen jatkaminen

Kun laitteiston fyysinen suorituskyky on todettu kykeneväksi mittauksiin, on seuraava suuri kokonaisuus laitteen ohjaus- ja mittausjärjestelmän suunnittelu. Ohjausjärjestelmään kuuluu PC-pohjainen tiedonkeräys- ja ohjausyksikkö. Järjestelmän suunnittelussa on huolehdittava muista mittauksista erillisen turvallisuusluokitellun lämpötilamittauksen toteuttaminen. Ohjausjärjestelmän suunnittelussa voisi harkita yhteistyötä SKB:n kanssa. Käyttämällä samaa ohjelmistoa voitaisiin vähentää suunnitteluun tarvittavia työtunteja ja ohjelmisto olisi testattu ydinvoimala ympäristössä. Suunnittelun lopputuloksena saadaan mittaukseen kuuluvien komponenttien määrä ja tyyppi. Komponenttien valinnan perustana ovat sopivien toimittajien etsiminen ja tarjouskyselyt.

Kun komponenttien tilavaraukset tiedetään, voidaan kalorimetrin päämitat vahvistaa. Tämän jälkeen voidaan edetä mekaniikan yksityiskohtaiseen suunnitteluun, missä on huomioitava kannen avaus ja lukitusmekanismi, laitteen jalusta, mittauskaapelien läpivienti, tukeminen altaassa, nostokorvakkeet, kannen tiivistäminen sekä polttoaineen tukeminen ja ohjaus mittauspesään. Lisäksi viimeistelyssä on huomioitava eristetilan kelluttava vaikutus. Ilmatilan tilavuus on yli 350 litraa, joka kykenee kelluttamaan 350 kg massan.

Yksityiskohtaisen suunnittelun tuloksena syntyvät osien valmistusasiakirjat, laadun varmistuskaaviot sekä laitteen huolto- ja käyttöopas. Suunnittelun perusteella voidaan tehdä lopulliset luku- ja rakennesuunnitelma. Rakennesuunnitelman sisältö vaihtelee kohteen mukaan,



mutta siinä tulee esittää vähintään valmistusta ja käyttöönottoa koskevat laadunhallintamenettelyt. Rakennesuunnitelma on yksi osa lupamenettelyä, jolla laite luokitetaan ydintekniseen käyttöön.





## 6 Yhteenveto

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta varten on tarpeen tietää polttoaineen jälkilämpöteho. Jälkilämpötehon suuruus aiotaan määrittää laskennallisesti, mutta tätä ennen laskennalliset tulokset tulee validoida kokeellisesti. Jälkilämpötehon kokeellisissa mittauksissa on käytetty kalorimetria.

Diplomityön tavoitteena oli Loviisan voimalaitoksen ydinpolttoaineen jälkilämpötehon mittaamiseen käytettävän kalorimetrin konseptisuunnittelu. Suunnittelussa on hyödynnetty systemaattisen tuotekehityksen metodiikkaa. Kirjallisuuskatsauksen perusteella luotiin kuva teknologian tasosta ja löydettiin sopiva laitteisto suunnittelun vertailukohdaksi. Kalorimetrin toiminnalle asetettiin vaatimuksia, joita noudattamalla varmistutaan laitteen soveltumisesta käyttötarkoitukseen. Toimintorakenteen määrittämisellä tunnistettiin laitteen toimintojen ja elinkaaren asettamat vaatimukset.

Tuotekonseptin luonnostelussa hyödynnettiin kirjallisuuskatsauksessa löytyneitä laitteistoja. Rakenneanalyysin avulla esimerkkilaitteistosta tunnistettiin puutteita, joihin etsittiin ratkaisuja systemaattisen tuotekehityksen menetelmillä. Kehitettyjä konsepteja vertailtiin keskenään pistearvioinnin avulla valmistettavuuden, käytettävyyden ja mittauksen toteutettavuuden perusteella. Kaksi parasta konseptia valittiin jatkokehitykseen, jonka aikana poistettiin menetelmien heikkouksia. Kehitystyön lopputuloksena löydettiin toimivin konsepti.

Lämmön siirtymisestä rakennettiin malli rakenteen päämittojen valintaa varten. Päämittojen avulla tehtiin rakenteen lujuusopillinen tarkastelu, jonka tuloksena saatiin kantavan rakenteen ainevahvuudet. Ainevahvuuksien avulla tarkennettiin kalorimetrin lämpöteknistä mallia. Kalorimetrin kokonaislämpöhäviöksi laskettiin noin  $7 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ .

Kalorimetrillä mitattava lämpöteho vaihtelee välillä 50...200 W, riippuen käytetyn polttoaineen jäähtymisajasta. Simulointimallin avulla kalorimetrin lämpenemisnopeudeksi 200 W lämpöteholla saatiin  $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$  ja 50 W teholla  $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$ .

Pienemmän lämpötehon mittaaminen vaatii joitain erityisjärjestelyitä, sillä suunniteltua kuuden asteen lämpötilaeroa ei saavuteta yhden työpäivän aikana. Mittausta voidaan nopeuttaa pienentämällä lämpötilaeroa tai lisäämällä mittauspiirin lisälämmitin. Lisälämmitintä voidaan käyttää kalorimetrin kalibrointiin, jolloin voidaan pienentää mittauserävarmuutta. Työssä on myös pohdittu kalibrointielementin mitoitus ja toimintaperiaatetta.

Oman haasteen työhön aiheutti ristiriitaiset vaatimukset ydinturvallisuuden ja mittausten suorittamisen välillä. Erityistä huomiota annettiin rakenteen lämpöhäviöiden tunnistamiseen ja lujuustekniselle perusmitoitukselle. Simulointimalli vahvistaa laitteen soveltuvuuden lämpötehon

mittaamiseen, vaikka pienimpien tehojen mittauksessa joudutaan käyttämään erikoisjärjestelyitä.

Työlle asetetut vaatimukset täyttyivät, sillä mittaukset mahdollistava rakennemalli löytyi. Ongelmat pienimpien tehojen mittauksissa johtuivat reaaliaikailman fysikaalisista ilmiöistä, joihin vastaaminen mekaniikan keinoin lisäisi rakenteen monimutkaisuutta huomattavasti. Kalorimetrimin jatkokehittäminen voidaan perustaa tämän työn tuloksiin.



## Lähdeluettelo

A 733/2002. Valtioneuvoston asetus ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta.

Agrenius, L. & Vogt, J. 1998. CLAB - Residual heat and gamma measurements on 14 BWR and 31 PWR spent fuel assemblies. Status report prepared for the IAEA SPAR-meeting in Washington D.C. 20-24 April 1998. 25 s.

Aissa, M. 2010a. Spent fuel decay heat measurements performed at the Swedish central interim storage facility. Prepared by Murphy, B.D. & Gauld, I.C. United States nuclear regulatory commission. 68 s. + liit. NUREG/CR-6971.

Aissa, M. 2010b. Validation of SCALE 5 decay heat predictions for LWR spent nuclear fuel. Prepared by Gauld I.C, Illas G, Murphy B.D. & Weber C.F. United States nuclear regulatory commission. 115 s + liit. NUREG/CR-6972.

Apros 2012. Process simulation software. Nuclear and thermal power plant applications. [verk-kosivusto]. [Viitattu 5.11.2012]. Saatavissa [www.apros.fi/en/](http://www.apros.fi/en/)

ASME 2011a. ASME boiler and pressure vessel code : an international code. Section 2, Materials. [New York, N.Y.] : American Society of Mechanical Engineers, cop. 2010.

ASME 2011b. ASME boiler and pressure vessel code : an international code. Section 3, Rules for construction of nuclear facility components. Division 1 - Subsection ND, Class 3 components [New York, N.Y.] : American Society of Mechanical Engineers, cop. 2011.

Bejan, A. & Kraus, A. 2003. Heat transfer handbook / Adrian Bejan, Allan D. Kraus. Norwich, NY : Knovel, 2003. ISBN 1-59124-513-3.. s. 1480

Buschow, K. H. Jürgen. 2001. Encyclopedia of materials : science and technology [Elektroninen aineisto]. Editors-in-chief K. H. Jürgen Buschow ... [et al.]. Oxford: Elsevier. 10388 s. ISBN 0-08-043152-6.

Callister, William D. ; Rethwisch, David G. 2011. Materials science and engineering: an introduction. Hoboken, NJ : Wiley, cop. 2011. 885 s. ISBN 978-0-470-50586-1.

Çengel 2006, 732. Heat and mass transfer : a practical approach / Yunus A. Çengel. Singapore : McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-125739-X., ISBN 978-0-07-125739-8. s. 879

HAEA. 2003. Hungarian atomic energy authority, Report to the Chairman of the Hungarian Atomic Energy Commission on the Authority's investigation of the incident at Paks Nuclear Power Plant on 10 April 2003. s. 17. Id number: 1120.

Holland, F.A. & Bragg, R. 1995. Fluid flow for chemical engineers, 2<sup>nd</sup> edition. London: Elsevier. 373 s. ISBN 978-0-0805-2369-9.

Hyvä tietää uraanista. 2006. Hyvä tietää-julkaisusarja [verkkodokumentti]. Energiateollisuus ry / Erweko painotuote Oy. s. 27. Saatavissa: <http://www.energia.fi/julkaisut/14>

Hämäläinen, Pertti. 2006. Teollisuusputkien suunnittelu 1 - 2.2.2006. AEL Insko-seminaarit, painelaitetekniikka. Tampere. s. 5.

Ikäheimonen, Tarja K. 2002. Säteily ja sen havaitseminen [Elektroninen aineisto]. Toim. Tarja Ikäheimonen. Helsinki: Säteilyturvakeskus. (Säteily- ja ydinturvallisuus-kirjasarja; 1. osa). 197 s. ISBN 951-712-503-8. Saatavissa:

[http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/kirjasarja/fi\\_FI/kirjasarja/](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja/)

Kekkonen, L. 2012. Emailing: Parts Lists Yhteenveto\_20120709.xls [yksityinen sähköposti-viesti]. Vastaanottajat: Janne Mikkonen. Lähetetty 14.9.2012 klo10.34 (GMT +0200). Liitetiedosto: "Parts Lists Yhteenveto\_20120709.xls"

Kiitolinja kappaletavara 08/2011 [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.7.2012]. Saatavissa:

<http://www.kiitolinja.fi/>

KTMp 938/1999. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaitteista.

Kustonen, Karo. 2012. Termo 2012, polttoainepun kalorimetrin apros-malli ja alustavat simulointitulokset. FPWR-TERMO-360693. s. 20 [Ei julkinen].

L 11.12.1987/990. Ydinenergialaki.

Matzke, H. 2001. Nuclear waste management, materials aspects of. Teoksessa: Buschow, K. H. Jürgen. 2001, s.6384-6388.

Mayer, Elias. 2009. Final safety analysis report 9.1.2. Lopullinen turvallisuusseloste FNS-FSAR-77. 20 s. [ei-julkinen].

Mills, Kenneth C. 2002. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Materials Park (OH) : ASM International, 2002. ISBN 1-85573-569-5., ISBN 0-87170-753-5. s. 244

NEA. 2008. Nuclear energy agency. OECD-IAEA Paks fuel project final report, Committee on the safety of nuclear installations. s. 92. NEA/CSNI/R(2008)2.

Neuvostoliiton ydinenergian käytön valtionkomitea, Moskova 1987, käänös 22.5.1987. VVER-tyyppisten reaktoreiden polttoainesauvojen suojakuorimateriaalin ominaisuudet.

Olander, D.R. 2001. Light water reactor fuel design and performance. Teoksessa: Buschow, K. H. Jürgen. 2001, s. 4490-4504.

Pahl, Gerhard. & Beitz, Wolfgang. 1986. Koneensuunnitteluoppi. Suomentanut Uolevi Konttinen. Helsinki : Metalliteollisuuden Kustannus, 1990. 608 s. ISBN 951-817-468-7.

Parnes, Raymond. 2001. Solid mechanics in engineering. Chichester : Wiley, 2001. 728 s. ISBN 0-471-49300-7.

Phillips, J.R. 1991. Chapter 18: Irradiated fuel measurements. Teoksessa: Passive nondestructive assay of nuclear materials. Reilly, D. & et. al. Los Alamos national laboratory, 1991. 660 s. + liit. NUREG/CR-5550 / ISBN 0-16-032724-5.

PLK. 1981. Loviisa 1 fuel assembly. Tekninen asiakirja LO1.910.001 A [ei julkinen].

Prospero paljetasaimet tuoteluettelo 2010 [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 5.9.2012]. Saatavissa: <http://www.masino.fi/>



Rodriguez, P. 2001. Nuclear fuel cycles. Teoksessa: Buschow, K. H. Jürgen. 2001, s. 6299-6303.

Routamo, Tomi. & Toppila, Timo. 2007. Loviisa 1 & 2; Polttoainenipun kalorimetrimin soveltuvuus selvitys. Suunnitelma TJATE-A6-113. 19 s. + liit. [ei-julkinen].

Routamo, Tomi. 2009. Kalori; koelaitteistolla saatujen tulosten tulkinnasta. Muistio FNS-kalori-021. 6 s. [ei-julkinen].

Rämä, Tommi. 2009a. Kalori; testilaitteistolla suoritettut kokeet. Raportti FNS-kalori-019. 13 s. + liit. [ei-julkinen].

Rämä, Tommi. 2009b. Kalori; APROS-mallinnus. Raportti FNS-kalori-020. 14 s. + liit. [ei-julkinen].

Sandberg, Jorma. 2004. Ydinturvallisuus [Elektroninen aineisto]. Toim. Jorma Sandberg. Helsinki: Säteilyturvakeskus. (Säteily- ja ydinturvallisuus-kirjasarja; 5. osa). 418 s. ISBN 951-712-507-0. Saatavissa: [http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/kirjasarja/fi\\_FI/kirjasarja/](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja/)

Saunders, Peter. 2007. Radiation thermometry : fundamentals and applications in the petrochemical industry / Peter Saunders. Bellingham, Wash. : SPIE Press, 2007. ISBN 978-1-61583-726-7 (electronic bk.). 170 s.

SFS 2233. 1969. Putkistovarusteet. ISO/R 7 mukaiset ulkokierreläitännät. Metalliteollisuuden standardoimiskeskus TES. 1 s.

SFS 4161. 1989. Hitsatut ruostumattomat putket. Mitat, massat, painekertoimet ja tekniset toimitusehdot. Metalliteollisuuden standardoimiskeskus. 6 s.

SFS-EN 10216-5. 2005. Saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 5: Ruostumattomat teräsputket. Metalliteollisuuden standardoimisyhdistys ry. 85 s.

SFS-EN 10217-7. 2005. Hitsatut painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 7: Ruostumattomat teräsputket. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. 69 s.

Snellman, J. 2009. Loviisan voimalaitos / Polttoainenipun kalorimetrimin rakentaminen / periaatesuunnitelma. 9 s. [ei-julkinen].

STUK. 2012. Tekniset tiedot - Loviisa. Ydinvoimalaitokset, STUK [Verkkosivut]. [Viitattu 8.3.2012]. Saatavissa: [http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/loviisa/fi\\_FI/loviisa\\_tekniset/](http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/loviisa/fi_FI/loviisa_tekniset/)

Sturek, F. & Agrenius, L. 2006. Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, CLAB, Svensk Kärnbränslehantering AB. 298 s. SKB rapport R-05-62.

Sturek, F. 2008. Measurement of decay heat in spent nuclear fuel. The equipment. SKB:ssä 16.6.2008 pidetyn esityksen aineisto. 44 s.

Toppila, Timo. 2009. KALORI polttoainenipun jälkilämmön tuoton määrittäminen kalorimet-rillä perustuen kahteen mittaukseen samalla nipulla. Raportti. 3 s. [ei-julkinen].

USSR Atomic Energy Committee, Moscow 1986. Properties of uranium dioxide pellets.

Valtanen, Esko. 2010. Tekniikan taulukkokirja, 18. painos. Genesis-Kirjat Oy. 1176 s. ISBN 978-952-9867-35-6.

VR Transpointin kappaletavaraalogistiikan rahditusperusteet ja palvelumaksut 1.11.2011 [Verkojulkaisu]. [Viitattu 23.7.2012]. Saatavissa: <http://www.vrtranspoint.fi/>

Young, Warren C. ; Budynas, Richard G. ; Roark, Raymond J. 2002. Roark's formulas for stress and strain / Warren C. Young, Richard G. Budynas. Norwich (NY): Knovel, cop. 2002. 852 s. ISBN 1-59124-303-3.



